

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robototechniky

Simulace podvozku MR s využitím simulačního
systému ADAMS

Simulations of Mobile Robot Undercarriage in
ADAMS Simulation System

Student:

Bc. Jan Šeděnka

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Václav Krys Ph.D.

Ostrava 2012

Student:

Bc. Jan Šeděnka

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2301T013 Robotika

Téma:

Simulace podvozku MR s využitím simulačního systému ADAMS
Simulations of Mobile Robot Undercarriage in ADAMS Simulation System

Zásady pro vypracování:

1. Analyzujte možnosti simulačních systémů ADAMS a Pro/ENGINEER pro simulace pohybu podvozku mobilního robotického systému v terénu. Přístupy k simulacím, omezení, příklady.
2. Proved'te simulace virtuálního modelu stávajícího podvozku za účelem dimenzování jeho pohonů.
3. Ověřte simulací získané výsledky experimentálními měřeními a výpočty.
4. Práci doplňte podrobnou technickou dokumentací, popisy simulací a metodiky experimentálního ověřování výsledků.
5. Práci též doložte v elektronické podobě ve formátu MS WORD společně se simulačními modely.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

NOVÁK, P. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. 1. vydání. Praha: BEN Praha, 2005. 247 s. ISBN 80-7300-141-1.

KÁRNÍK, L. *Servisní roboty*. 1. vydání. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 139 s. ISBN 80-248-0626-6.

SMRČEK, J.; KÁRNÍK, L.; BOBOVSKÝ, Z. *Robotika – Servisné roboty na pásovom podvozku. Navrhovanie, konštrukcia, riešenia*. 1. vydání. Košice: Edícia ved. a odb. literatúry SjF TU, 2010. 248 s.

<http://www.mscsoftware.com/>

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Krys, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



prof. Dr. Ing. Petr Novák
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было с́еднано, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было с́еднано, že užít své dílo –diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

.....

plné jméno autora práce

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Tato práce se zabývá problémy spojenými s počátečním návrhem podvozku mobilního robotu. Srovnává simulace smykem řízeného podvozku pomocí programů Adams a ProEngineer s početním výpočtem naprogramovaným ve výpočetním softwaru Mathcad. Porovnány byly simulace jízdy podvozku po rovině, do kopce a otáčení na místě. Z výsledku bylo zjištěno, že výsledky pomocí simulace Adams a Mathcad jsou totožné. Výsledky simulací pomocí programu ProEngineer se odlišovaly. Výsledkem práce jsou výpočty n-kolových smykem řízených podvozků naprogramovaných v prostředí Mathcad. Je to výpočet, který významně urychlí dimenzování pohonu při koncepčním návrhu podvozku.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

This thesis is dedicated to problems in initial phases of mobile robot chassis design. Simulations of differentially driven chassis by simulation software Adams and ProEngineer were compared by numerical calculation programmed in computing software Mathcad. Results of chassis driving simulations were compared for simulations of straight drive, uphill drive and turning on the spot. From the results were found out that simulation results found out by Adams and Mathcad are the same. Results found out by software ProEngineer were different. Results of this thesis are calculations of n-wheeled differentially driven chassis programmed in software Mathcad. It is a calculation that can significantly accelerate drive design for conceptual design of the chassis.

Obsah

Seznam použitého značení.....	8
Úvod.....	10
1. Analýza řešené problematiky	11
1.1. Simulační modely kontaktů obecně	11
1.2. Kontakt dvou těles.....	13
1.3. Parametry popisující kontakt a tření	17
2. Požadavky na simulační model	21
2.1. Popis analyzovaného podvozku	21
2.2. Okrajové podmínky simulací	24
2.3. Popis servisní činnosti robotu	24
3. Simulační modely	26
3.1. Simulace pomocí programu Adams	26
3.2. Simulační model programu ProEngineer	28
3.3. Výpočtový model Mathcadu	30
3.4. Možnosti použití.....	37
4. Výsledky simulací	38
4.1. Simulace jízdy po rovině.....	38
4.2. Jízda do kopce	41
4.3. Otáčení se na místě.....	44
4.4. Zhodnocení výsledků	48
5. Závěr.....	53
6. Literatura	55

Seznam použitého značení

a	$[m/s^2]$	zrychlení
d_0	$[m]$	posunutí osy z vůči počátku
e	$[-]$	elasticita
f	$[-]$	kinematický koeficient tření
F	$[N]$	síla v ose x
f_0	$[-]$	statický koeficient tření
f_k	$[-]$	rameno valivého odporu
g	$[m/s^2]$	gravitační zrychlení
I	$[kg\ m^2]$	moment setrvačnosti
j	$[N\cdot s]$	impuls síly
k	$[N/m]$	koeficient tlumení
m_r	$[kg]$	hmotnost robotu
n	$[N\cdot m]$	moment
P	$[W]$	výkon
r	$[m]$	vektor vzdálenosti mezi dvěma body
R	$[N]$	síla v ose z
S	$[N]$	síla v ose y
s_0	$[m]$	vzdálenost mezi těžištěm a základním souřadným systémem v ose x
t	$[s]$	čas
v	$[m/s]$	rychlost
α_0	$[^\circ]$	natočení osy x vůči počátku
β	$[^\circ]$	úhel stoupání nakloněné roviny
ε	$[1/s^2]$	úhlové zrychlení
η	$[\%]$	účinnost
θ	$[^\circ]$	úhel natočení

τ	[N·m]	moment
φ_0	[°]	úhel natočení mezi souřadnými systémy kolem osy z
ω	[1/s]	úhlová rychlost

Úvod

Při návrhu konstrukčního řešení podvozku mobilního robotu nastává řada problému spojená s neznalostí kinematického a dynamického chování podvozku. Zjištění přibližného chování podvozku je možno buď na základě předchozích zkušeností s podobnými typy podvozků a nebo pomocí počítačových simulací. Z výsledku simulací nás zajímá především potřebný výkon pro vykonání zadaného pohybu a síly působící na podvozek při tomto pohybu.

Cílem mé diplomové práce je analyzovat podvozek mobilního průzkumného robotu. Podvozek průzkumného podvozku je šestikolový smykem řízený. Jedná se o první šestikolový podvozek realizovaný na katedře Robototechniky.

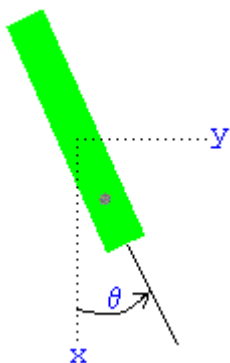
Podvozek bude analyzován pomocí počítačového programu ADAMS -View a bude proveden kontrolní výpočet početně. Výsledky analýzy budou porovnány. Kontrolní výpočet podvozku bude vypracován pro použití i u podvozku s jiným počtem kol.

1. Analýza řešené problematiky

Cílem této práce je kontaktní simulace, proto bude v následujícím textu vysvětlen postup při výpočtu kontaktu objektů. Program Adams pracuje se vstupními hodnotami 3D objektů. Pro zjednodušení výpočtů sil a zrychlení si však tyto úlohy převádí do rovin. Jeden ze způsobů výpočtu kontaktní simulace je popsán v následujícím textu[12].

1.1. Simulační modely kontaktů obecně

Pro popsání polohy objektu v rovině je zapotřebí tři veličin. Jak je znázorněno na Obr.1, jedná se o polohu těžiště v ose x, polohu těžiště v ose y a natočení objektu kolem těžiště o úhel θ .



Obr.1. Poloha objektu v rovině

Další parametry, které jsou potřebné pro výpočet kontaktů, jsou rychlosti a zrychlení v těžišti těles. Tyto parametry získáme první a druhou derivací polohy podle času.

$x'=v_x$ - rychlost v ose x

$y'=v_y$ - rychlost v ose y

$\theta'=\omega$ - úhlová rychlost

$x''=a_x$ - zrychlení v ose x

$y''=a_y$ - zrychlení v ose y

$\theta''=\varepsilon$ - úhlové zrychlení

Z takto zjištěných kinematických parametrů jsme schopni vypočítat dynamické parametry. K výpočtu dynamických parametru potřebujeme znát hmotnost robotu m a moment setrvačnosti I vypočtený k těžišti robotu.

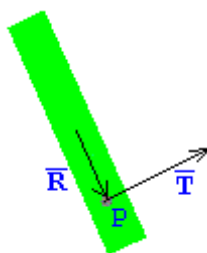
$$F_x = mx'' - \text{síla v ose } x \quad (1)$$

$$F_y = my'' - \text{síla v ose } y \quad (2)$$

$$\tau = I\theta'' - \text{moment působící v těžišti} \quad (3)$$

Aplikovaná síla

Pokud na těleso působí síla mimo těžiště objektu, musíme znát vektor síly $\mathbf{T}=(T_x, T_y)$ a vektor délky z těžiště do působíště síly $\mathbf{R}=(R_x, R_y)$.



Obr.2. Vektory aplikované síly

Z předešlých vzorců vyplývá, že zrychlení těžiště se vypočte jako:

$$mx'' = T_x \quad (4)$$

$$my'' = T_y \quad (5)$$

$$I\theta'' = \mathbf{R} \times \mathbf{T} = R_x T_y - R_y T_x \quad (6)$$

Mezi další aplikované síly patří síla gravitační způsobená gravitačním zrychlením g . Velikost této síly se vypočte jako $m \cdot g$. Směr této síly je opačný než směr gravitačního zrychlení. Jelikož gravitační zrychlení působí v těžišti objektu, nevzniká žádný moment. V našem případě bude gravitační zrychlení působit v ose y .

Mezi další síly působící na objekt jsou síly třecí. Tyto síly působí v opačném směru pohybu a jejich velikost je přímo úměrná velikosti rychlosti v tomto směru. Třecí síla $\mathbf{B}=(B_x, B_y)$ závisí na koeficientu tření f .

Silovou rovnováhu těžiště ovlivňuje ještě tlumení. Koeficient tlumení se značí k . Tlumící síla má velikost součinu koeficientu tlumení a rychlosti. Směr této tlumící síly je opačný na směr rychlosti.

Z toho vyplývá, že na těžiště tělesa působí následující síly:

$$mx'' = T_x + B_x - kx' \quad (7)$$

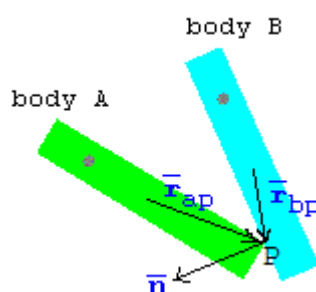
$$my'' = T_y + B_y - ky' \quad (8)$$

$$I\theta'' = \mathbf{R} \times \mathbf{T} + \mathbf{R} \times \mathbf{B} - k\theta' \quad (9)$$

Tyto rovnice mohou být rozšířeny o síly vzniklé v důsledku vlastních frekvencí, aerodynamické síly, atd.. Tyto rovnice však platí, pouze pokud nedojde ke kontaktu s jinými tělesy.

1.2. Kontakt dvou těles

Kontakt dvou těles se dá vypočítat pouze jako dynamickou soustavu, protože v místě kontaktu vznikají reakční síly. Tyto reakční síly jsou přímo úměrné hmotnostem objektů a jejich rychlostem.



Obr.3. Kontakt dvou těles

m_a, m_b = hmotnost objektů A, B

\mathbf{r}_{ap} = vektor vzdálenosti mezi těžištěm a bodem P objektu A

\mathbf{r}_{bp} = vektor vzdálenosti mezi těžištěm a bodem P objektu B

ω_{a1}, ω_{b1} = počáteční před-kolizní úhlová rychlost objektů A, B

ω_{a2}, ω_{b2} = konečná po-kolizní úhlová rychlost objektů A, B

$\mathbf{v}_{a1}, \mathbf{v}_{b1}$ = počáteční před-kolizní rychlost těžiště objektů A, B

$\mathbf{v}_{a2}, \mathbf{v}_{b2}$ = konečná po-kolizní rychlost těžiště objektů A, B

\mathbf{v}_{ap1} = počáteční před-kolizní rychlost kontaktního bodu objektů A

\mathbf{v}_{bp1} = počáteční před-kolizní rychlost kontaktního bodu objektů B

\mathbf{n} = normálový vektor hrany tělesa B

e = elasticita kontaktu (0 = nepružný, 1 = perfektně pružný)

Kinematika kontaktu

Výpočet před-kolizních rychlostí v bodě kontaktu P :

$$\mathbf{v}_{ap1} = \mathbf{v}_{a1} + \omega_{a1} \times \mathbf{r}_{ap} \quad (10)$$

$$\mathbf{v}_{bp1} = \mathbf{v}_{b1} + \omega_{b1} \times \mathbf{r}_{bp} \quad (11)$$

Podobně se vypočtou po-kolizní rychlosti v bodě kontaktu P:

$$\mathbf{v}_{ap2} = \mathbf{v}_{a2} + \omega_{a2} \times \mathbf{r}_{ap} \quad (12)$$

$$\mathbf{v}_{bp2} = \mathbf{v}_{b2} + \omega_{b2} \times \mathbf{r}_{bp} \quad (13)$$

Nyní můžeme vypočítat rychlosti, kterými se body kontaktu k sobě blíží. Potřebujeme vypočíst tyto relativní rychlosti pro před-kolizní stav \mathbf{v}_{ab1} a po-kolizní stav \mathbf{v}_{ab2} .

$$\mathbf{v}_{ab1} = \mathbf{v}_{ap1} - \mathbf{v}_{bp1} = \mathbf{v}_{a1} + \omega_{a1} \times \mathbf{r}_{ap} - \mathbf{v}_{b1} - \omega_{b1} \times \mathbf{r}_{bp} \quad (14)$$

$$\mathbf{v}_{ab2} = \mathbf{v}_{ap2} - \mathbf{v}_{bp2} = \mathbf{v}_{a2} + \omega_{a2} \times \mathbf{r}_{ap} - \mathbf{v}_{b2} - \omega_{b2} \times \mathbf{r}_{bp} \quad (15)$$

Nechť je vektor \mathbf{n} kolmý na hranu objektu B, která je hranou kontaktu, a směřuje ven z objektu B. Celková délka vektoru \mathbf{n} je 1. Pak platí následující vztah mezi relativními rychlostmi:

$$\mathbf{v}_{ab2} \cdot \mathbf{n} = -e\mathbf{v}_{ab1} \cdot \mathbf{n} \quad (16)$$

Z tohoto vztahu je zřejmé, že relativní po-kolizní rychlost je opačného směru než rychlost před-kolizní. Pokud je elasticita $e=1$, tělesa se od sebe vzdalují stejnou rychlostí jakou se k sobě přibližovala. V opačném případě kdy jsou tělesa nepružná a elasticita $e=0$ tělesa do sebe narazí, ale po nárazu se body těles vůči sobě nepohybují.

Abychom byli schopní vypočítat všechny parametry použijeme metodu výpočtu pomocí impulsu. Impuls j je definován jako změna hybnosti objektu, když je aplikována velká síla na objekt po krátký čas. Tato metoda nepočítá s deformací míst kontaktů objektů. Předpokládáme nulové tření pro naši kolizi. Takže jediná síla během kolize vzniká působením impulsu se směrem kolmým na hranu objektu B, tedy ve směru \mathbf{n} . Potom můžeme impuls vyjádřit jako $j \cdot \mathbf{n}$. Tento impuls má jednotku hybnosti kg*m/s, proto jej vydělíme hmotností objektů, abychom dostali změnu rychlosti před a po kolizi.

Změna rychlosti u objektu A je ve směru vektoru \mathbf{n} , u objektu B je změna proti směru vektoru \mathbf{n} .

$$\mathbf{v}_{a2} = \mathbf{v}_{a1} + j\mathbf{n}/m_a \quad (17)$$

$$\mathbf{v}_{b2} = \mathbf{v}_{b1} + j\mathbf{n}/m_b \quad (18)$$

Stejně vypočteme úhlové rychlosti objektů.

$$\omega_{a2} = \omega_{a1} + (\mathbf{r}_{ap} \times j\mathbf{n})/I_a \quad (19)$$

$$\omega_{b2} = \omega_{b1} + (\mathbf{r}_{bp} \times j\mathbf{n})/I_b \quad (20)$$

Výpočet impulsu síly

Výpočet impulsu začneme rovnicí (16), do které dosadíme z rovnic (14) a (15).

$$\mathbf{v}_{ab2} \cdot \mathbf{n} = -e\mathbf{v}_{ab1} \cdot \mathbf{n} \quad (16)$$

$$(\mathbf{v}_{a2} + \omega_{a2} \times \mathbf{r}_{ap} - \mathbf{v}_{b2} - \omega_{b2} \times \mathbf{r}_{bp}) \cdot \mathbf{n} = -e\mathbf{v}_{ab1} \cdot \mathbf{n} \quad (21)$$

V této rovnici však máme po-kolizní rychlosti, které jsou pro nás neznámé. Proto dosadíme rovnice (17-20) .

$$\begin{aligned} & \left((\mathbf{v}_{a1} + j\mathbf{n}/m_a) + (\omega_{a1} + (\mathbf{r}_{ap} \times j\mathbf{n})/I_a) \times \mathbf{r}_{ap} - (\mathbf{v}_{b1} + j\mathbf{n}/m_b) - \right. \\ & \left. \omega_{b1} + (\mathbf{r}_{bp} \times j\mathbf{n})/I_b \times \mathbf{r}_{bp} \right) \cdot \mathbf{n} = -e\mathbf{v}_{ab1} \cdot \mathbf{n} \end{aligned} \quad (22)$$

V této rovnici je jedinou neznámou impuls síly. Tuto rovnici nyní pomocí matematických operací upravíme.

$$j \left(\frac{1}{m_a} + \frac{1}{m_b} + \frac{(\mathbf{r}_{ap} \times \mathbf{n})^2}{I_a} + \frac{(\mathbf{r}_{bp} \times \mathbf{n})^2}{I_b} \right) = -(1 + e)\mathbf{v}_{ab1} \cdot \mathbf{n} \quad (23)$$

Nyní můžeme vyjádřit impuls.

$$j = \frac{-(1 + e)\mathbf{v}_{ab1} \cdot \mathbf{n}}{\frac{1}{m_a} + \frac{1}{m_b} + \frac{(\mathbf{r}_{ap} \times \mathbf{n})^2}{I_a} + \frac{(\mathbf{r}_{bp} \times \mathbf{n})^2}{I_b}} \quad (24)$$

Pomocí vypočteného impulsu síly můžeme dopočítat po-kolizní parametry rychlostí. Nyní máme vypočteny všechny kinematické parametry a můžeme vypočíst silové účinky působící na těžiště pomocí vzorců (4-6).

Může nastat i speciální případ kdy objekt narazí na pevné nepohyblivé těleso. V takovýchto případech dosadíme do výpočtu impulsu $m_b \rightarrow \infty$ a $I_b \rightarrow \infty$. Dostaneme matematický výraz:

$$j = \frac{-(1 + e)\mathbf{v}_{ab1} \cdot \mathbf{n}}{\frac{1}{m_a} + \frac{(\mathbf{r}_{ap} \times \mathbf{n})^2}{I_a}} \quad (25)$$

1.3. Parametry popisující kontakt a tření

Simulační model musí mít zadány fyzikální a materiálové vlastnosti kontaktů, aby výstupní hodnoty simulací odpovídaly co nejvíce skutečnosti. Z předešlého výpočtu vyplývá, že pro výpočet simulace kontaktu je nutno zadat koeficient tření a parametry definující elasticitu objektu.

Smykové tření

Tření vzniká v kontaktních plochách mezi dvěma tělesy. Je způsobeno nerovnostmi v kontaktních plochách, které se o sebe otírají. Velikost třecí síly je úměrná normálové síle působící na třecí plochy a koeficientu smykového tření.

Pokud je na těleso aplikovaná síla nutící těleso k pohybu, působí třecí síla proti směru pohybu. Pokud je aplikovaná síla menší než třecí síla těleso se nepohybuje (statická oblast Obr.4). Když aplikovaná síla je větší než síla třecí těleso se začne pohybovat (kinematická oblast Obr.4).

Z Obr.4 je zřejmé že koeficient tření není konstantní a mění se v závislosti na stavu tělesa. Jedná se o tzv. Coulombovo tření, které počítá s rozdílným koeficientem smykového tření pro statická a kinematická tělesa za stejných podmínek. Statický koeficient smykového tření je vždy větší než kinematický koeficient smykového tření.



Obr.4. Závislost třecí a aplikované síly

Kontakt	Statický koeficient tření f_0	Kinematický koeficient tření f
Př. na ledu	0,15	0,1
Př. na mokřém betonu	0,7	0,45
Př. na suchém betonu	0,8	0,65
Př. na suché dlažbě	0,7	0,55
Př. na mokřem asfaltu	0,35	0,2
Př. na suchém asfaltu	0,55	0,4

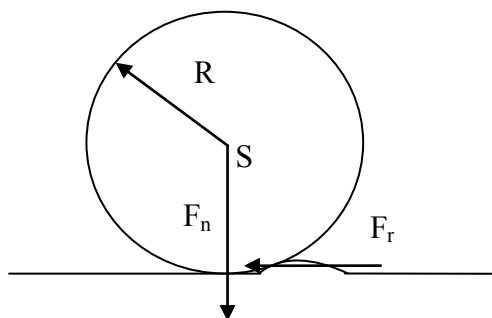
Tab.1. Koeficienty smykového tření

Měření koeficientu tření se provádí dvěma základními způsoby. První způsob je umístění tělesa na nakloněnou rovinu a postupným zvětšováním úhlu naklonění roviny. Měříme úhel, při kterém se těleso začne pohybovat. Výsledný statický koeficient tření se vypočte pomocí úhlu naklonění, hmotnosti tělesa a gravitačního zrychlení.

Druhou možností je pomocí siloměru měřit tažnou sílu. Tímto způsobem lze zjistit statický i kinematický koeficient tření, který se vypočte z tažné síly, hmotnosti a gravitačního zrychlení.

Valivé tření

Je tření, které vzniká při odvalování tělesa po podložce. Valivé tření vzniká v důsledku nedokonalostí povrchu a deformací valícího se tělesa a podložky. Velikost valivého tření je přímo úměrné normálové síle mezi podložkou a valícím se tělesem a ramenem valivého odporu a nepřímo úměrné poloměru valícího se tělesa. Rameno valivého odporu je vzdálenost mezi normálovou silou a deformovaným povrchem.



Obr.5. Valivý odpor

Kontakt	Rameno valivého odporu f_k [m]
Přýž na betonu	0,015 - 0,025
Přýž na dlažbě	0,02 - 0,03
Přýž na linoleu	0,01 - 0,02
Přýž na koberci	0,05 - 0,07
Přýž na písku	0,2 - 0,3

Tab.2. Tabulka ramen valivého odporu

Youngův modul

Číselně vyjadřuje chování materiálu zatíženého tahovým napětím. Čím je Youngův modul větší tím je potřeba vyvinout větší napětí na dosažení stejné deformace při stejném průřezu. Youngův modul je někdy označován jako modul pružnosti v tahu. Modul je pro daný materiál závislý na teplotě, se zvyšující se teplotou se modul snižuje. Youngův modul se značí písmenem E a jeho hodnoty se uvádějí v GPa.

Materiál	Youngův modul [GPa]
Beton	30
Korek	13
Molitán	3 - 3,6
Oceli	190 - 210
Písek	10 - 25
Přýž	0,01 - 0,1
Sklo	72

Tab.3. Hodnoty Youngova modulu

Poissonovo číslo

Vyjadřuje poměr poměrného příčného zkrácení k poměrnému podélnému prodloužení v oblasti pružných deformací. Poissonovo číslo se označuje písmenem μ . Hodnota μ vyjadřuje pružnou stlačitelnost tělesa tedy schopnost zmenšovat (při stlačení), nebo zvětšovat (při tahu) svůj objem během pružné deformace.

Materiál	Poissonovo číslo[-]
Beton	0,20
Korek	0,01
Molitan	0,10 - 0,40
Oceli	0,27 - 0,3
Písek	0,20 - 0,45
Přýž	0,50
Sklo	0,24

Tab.4. Hodnoty Poissonova čísla

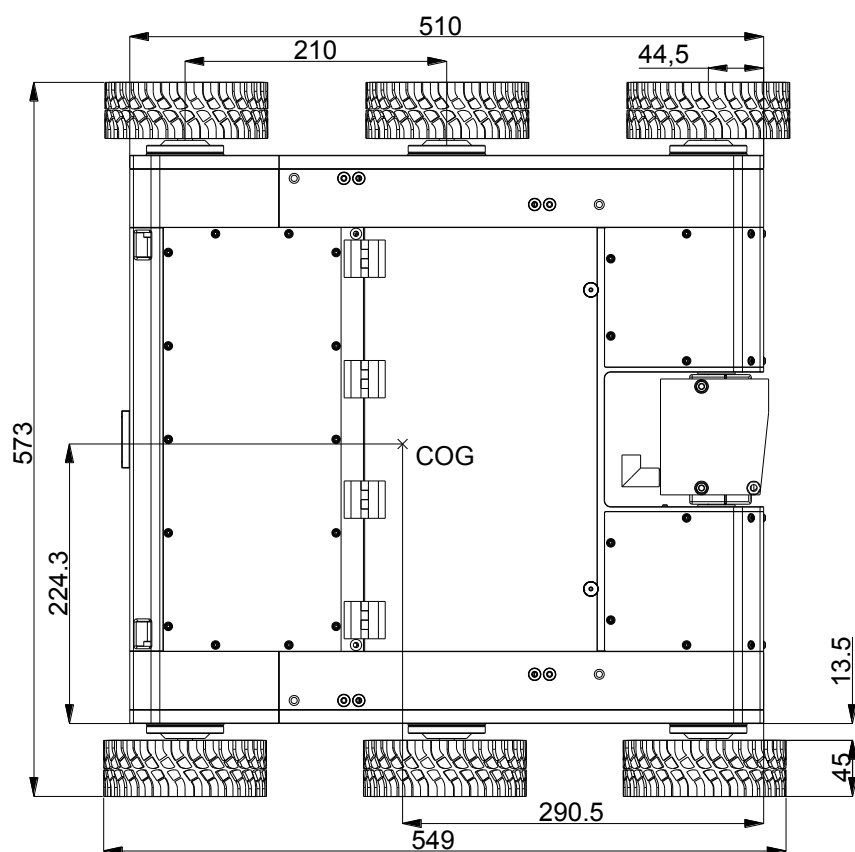
2. Požadavky na simulační model

V simulačních modelech musí být zohledněny parametry skutečného modelu, jako je umístění těžiště vůči kontaktním plochám, hmotnost simulačního modelu, momenty setrvačnosti pohybujících se součástí, atd.

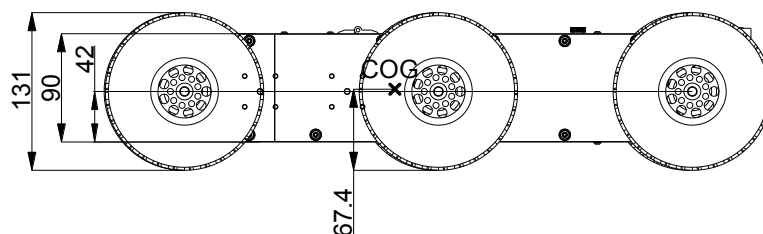
2.1. Popis analyzovaného podvozku

Analyzovaný mobilní robot je určen k průzkumu míst s malou výškou. Počítá se s nasazením robotu pro průzkum podvozku automobilů a ploch s rovným terénem.

Podvozek je tvořen šesti koly, které pohání dva motory. Řízení pohybu je smykové. Robot je řízen z operátorského stanoviště.



Obr. 6. Půdorys mobilního robotu



Obr. 7. Narys mobilního robotu

Na Obrázku 6 a 7 je vyobrazen mobilní robot se základními rozměry a umístěním těžiště (COG). Tyto rozměry jsou důležité pro vytvoření následného zjednodušeného modelu simulace.

Motor GR63Sx55

Parametry motoru:

výkon motoru: 130 W

vstupní napětí: 24 VDC

jmenovité otáčky: 3500 1/min

jmenovitý moment: 0,32 N*m

jmenovitý proud: 5,8 A

startovací moment: 3,4 N*m

startovací proud: 53,3A

otáčky nezatíženého motoru: 3550 1/min

proud nezatíženého motoru: 0,56A

moment setrvačnosti: $0,75 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

hmotnost motoru: 1,7 kg



Obr.8. Motor GR63Sx55

Převodovka PLG 63

převodový poměr: 10

účinnost: 0,9

jmenovitý krouticí moment: 15 N*m

hmotnost: 0,7 kg

axiální zatížení/radiální zatížení: 800/800 N



Obr.9. Převodovka PLG 63

Jmenovité výstupní otáčky na kolo robotu jsou 350 1/min. Pomocí průměru kola byla vypočtená jmenovitá rychlost 2,38 m/s. Výstupní výkon motoru je snížen o účinnost převodovky 90% a účinnost ozubeného převodového řemene 98%. Maximální výstupní výkon je 115 W. Ve skutečnosti je tato hodnota nižší o tření působící v ložiscích.

2.2.Okrajové podmínky simulací

Simulační modely kontaktů lze vypočítat pouze jako dynamickou simulaci. Této podmínce musí vyhovovat i námi zadané parametry.

Hmotnost - Jelikož se jedná o dynamickou analýzu, musí být všechna tělesa modelu hmotná. V našem případě je hmotnost rámu 20kg. Protože musí být všechna tělesa hmotná, byla kolům přiřazena minimální hustota povolená simulačním programem. Tyto hmotnosti jsou však svou velikostí zanedbatelné a simulační model neovlivňují.

Moment setrvačnosti - stejně jako v případě hmotnosti je nutno zadat matici setrvačnosti modelu, aby mohla simulace proběhnout. Momenty setrvačnosti kol je vypočtená pomocí zadané hustoty a stejně jako v případě hmotnosti jsou zanedbatelné.

Rámu robotu je nastavena matice setrvačnosti jako $\begin{bmatrix} 0,36 & 0 & 0 \\ 0 & 0,78 & 0 \\ 0 & 0 & 0,44 \end{bmatrix} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.

Tření -hodnoty smykového tření budou zadány podle tabulky 1. Hodnota smykového tření je stanovená pro kontakt pryž na suchém betonu. Aby se daly výsledky simulace ověřit početně je statický koeficient tření a kinematický koeficient tření nastaven stejně a to na hodnotu 0,61.

Tuhost kontaktu - je zadána jako hodnota 5000 N*m/s pro kontakt s absolutně tuhou podložkou a je to hodnota pro pneumatiku viz odkaz [9]. Pokud bude potřeba zadat pro definici kontaktu Younguv modul a Poissonovo číslo budou použity hodnoty pryže pro kolo a hodnoty betonu pro zem viz tab.3 a tab.4.

Tlumení - tato hodnota je nutná, aby simulace mohla proběhnout, výsledky naší simulace ale neovlivní. Proto bude tato hodnota zadána tak, aby nedocházelo k oscilaci soustavy.

2.3.Popis servisní činnosti robotu

Mobilní podvozek je navržen pro průzkum míst s malou výškou a to od 132mm. Je určen k průzkumu parkovišť, skladišť, budov, atd.. Vzhledem k malé světlé výšce robotu není určen k průzkumu nerovného terénu nebo schodišť.

Mobilní robot je opatřen dvěma kamerami určenými k orientaci a průzkumu prostředí. Jedná se o analogové kamery, jejichž signál je zpracován v elektronice

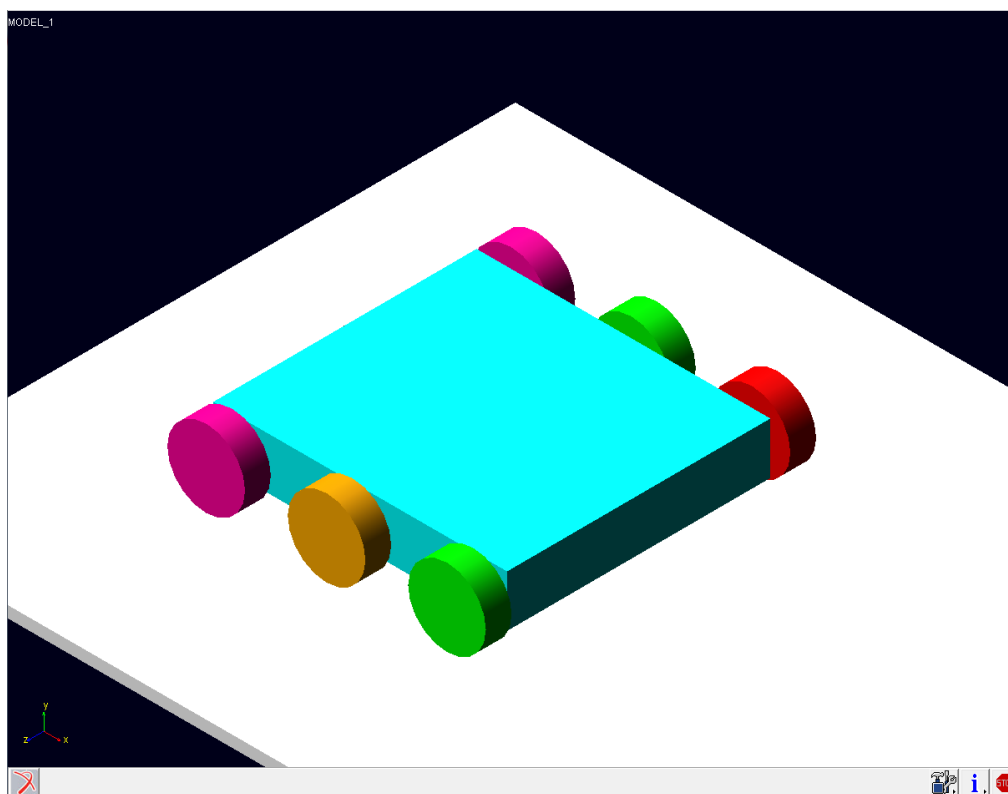
mobilního robotu a poté poslán pomocí bezdrátové komunikace operátorovi. Přední kameru může operátor naklápět a tak lépe prozkoumat dané prostředí. Pro lepší orientaci je robot vybaven laserovým dálkovým senzorem. Tento senzor je využit ke zjištění vzdáleností objektů.

3. Simulační modely

Simulace jízdních vlastností bude provedena pomocí programů dostupných na katedře Robototechniky. Jedná se o program Adams a ProEngineer. Kontrolní výpočet bude proveden pomocí programu Mathcad.

3.1. Simulace pomocí programu Adams

V programu Adams/view byl vytvořen zjednodušený model robotu podle rozměru modelu. Hmotnost celého robotu je soustředěna pouze na tělo robotu. Pohyb simulovaného modelu zajišťují dva motory, které jsou nastaveny tak, aby každý poháněl všechna kola na jedné straně. Mezi koly a podložkou byl vytvořen kontakt.



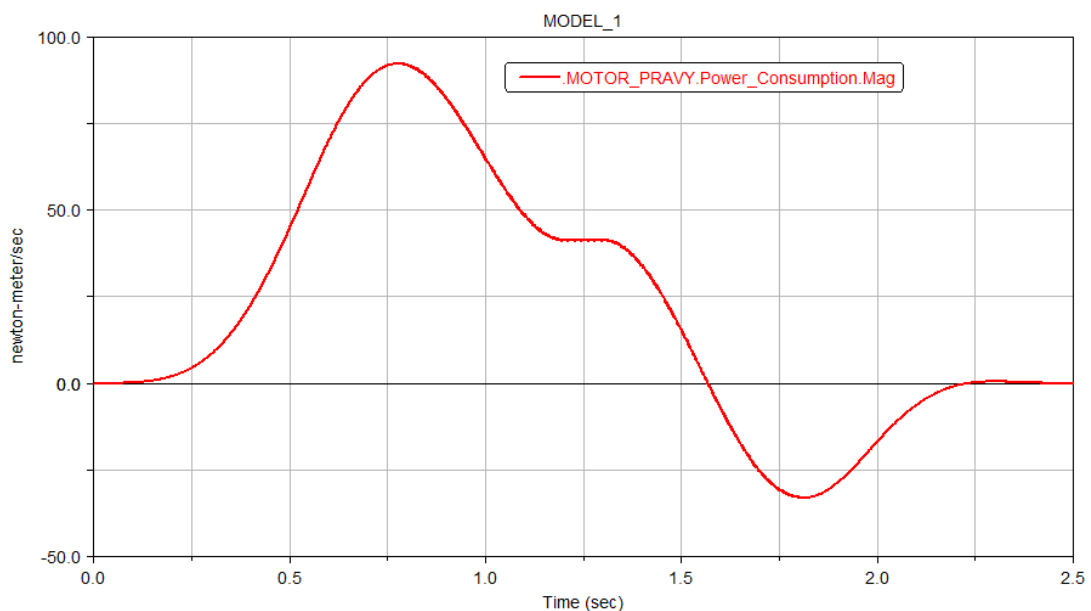
Obr.10. Simulovaný model v programu Adams

Kontakt byl nastaven zvlášť mezi každým kolem a zemí. Hodnoty pro definici kontaktu byly nastaveny dle Obr.11. Tuhost kontaktu byla nastavena na $5000 \text{ N}^*\text{m/s}$ což je hodnota tuhosti pneumatik, počítáme tedy s naprosto tuhou zemí. Pro kontakt je nastaven exponent síly na hodnotu 1. Tlumení kontaktu je nastaveno na 1000 N/m . Pro idealizaci kontaktu bylo nastaveno, že kontaktní plocha je dokonale tuhá (penetration depth) a koeficient tření je po celou dobu simulace stejný a to 0,61.

Normal Force	Impact
Stiffness	5000.0
Force Exponent	1
Damping	1000.0
Penetration Depth	0.0
<input type="checkbox"/> Augmented Lagrangian	
Friction Force	Coulomb
Coulomb Friction	On
Static Coefficient	0.61
Dynamic Coefficient	0.61
Stiction Transition Vel.	1.0E-003
Friction Transition Vel.	1.0E-003

Obr.11. Nastavení kontaktu

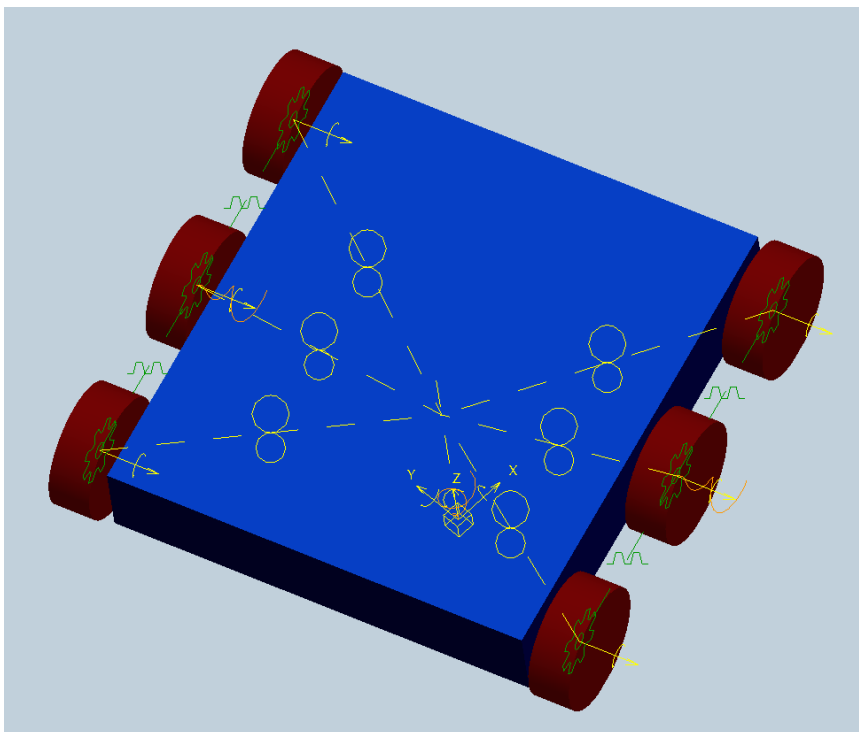
Kontakt je nastaven jako "Impact". To znamená, že výpočet probíhá pomocí výpočtu impulsu. Pro takovýto výpočet je nutné znát předkolizní rychlost. Z tohoto důvodu musí být simulační model umístěn těsně nad podložkou v počátku simulace. Pokud tato podmínka není splněna, dochází k nelogickému chování modelu v počátku simulace.



Obr.12. Výkon levého motoru při jízdě po rovině

3.2. Simulační model programu ProEngineer

V programu ProEngineer byl vytvořen zjednodušený model robotu. Model se skládá z rámu o hmotnosti 20 kg s posunutým těžištěm, aby odpovídal reálnému modelu. Kola jsou připevněna k rámu rotační vazbou. Kola na každé straně jsou spojena pomocí převodu. Pohon kol je zajištěn dvěma motory umístěnými na rotačních vazbách prostředních kol. Mezi koly a podložkou byly vytvořeny vazby typu kontakt.



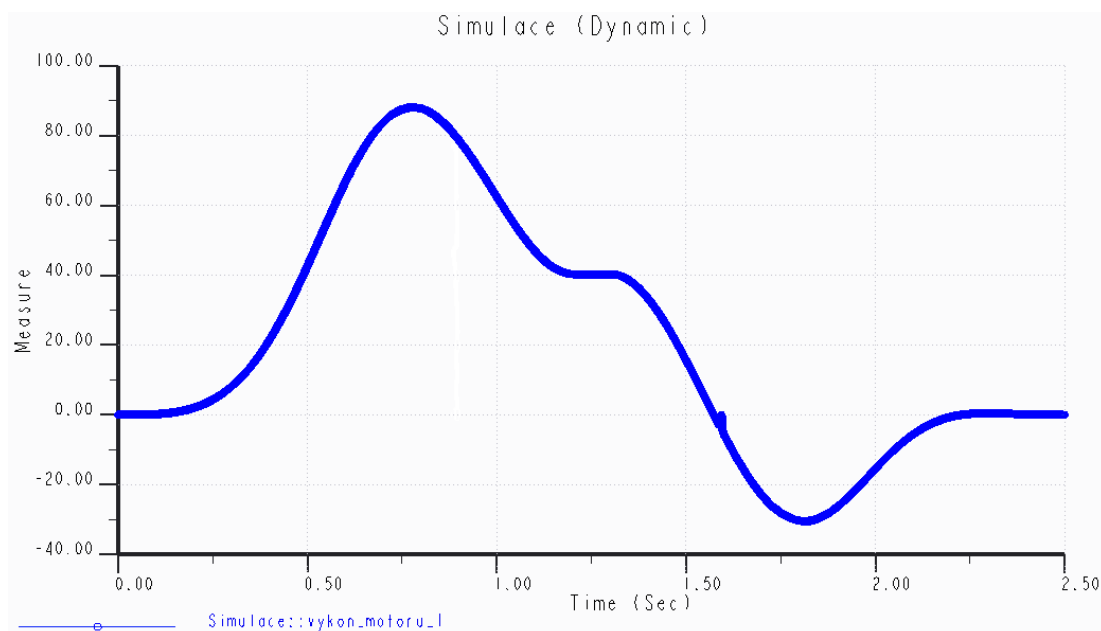
Obr.13. Zjednodušený model v programu ProEngineer

Kontakt v programu ProEngineer se nastavuje pomocí Poissonova čísla, Youngova modulu a hodnoty tlumení. Kolům v simulaci byly přiřazeny hodnoty Poissonova čísla, Youngova modulu pro gumu a hodnoty betonu byly přiřazeny podložce. Hodnota tlumení byla přiřazena pouze betonu. Koeficient statického a dynamického tření byl nastaven na 0,61.

Side1 Contact Properties		
	Use values	More...
Poisson's ratio	0.490000	
Young's modulus	50.000000	N / mm ²
Damping	0.000000	sec / mm
Side2 Contact Properties		
	Use values	More...
Poisson's ratio	0.200000	
Young's modulus	30000.000000	N / mm ²
Damping	100.000000	sec / mm

Obr.14. Nastavení kontaktu v programu ProEngineer

Simulační model ProEngineer není založen na výpočtu impulsu a není nutné umisťovat model nad zem.



Obr.15. Výkon levého motoru při jízdě do kopce

3.3. Výpočtový model Mathcadu

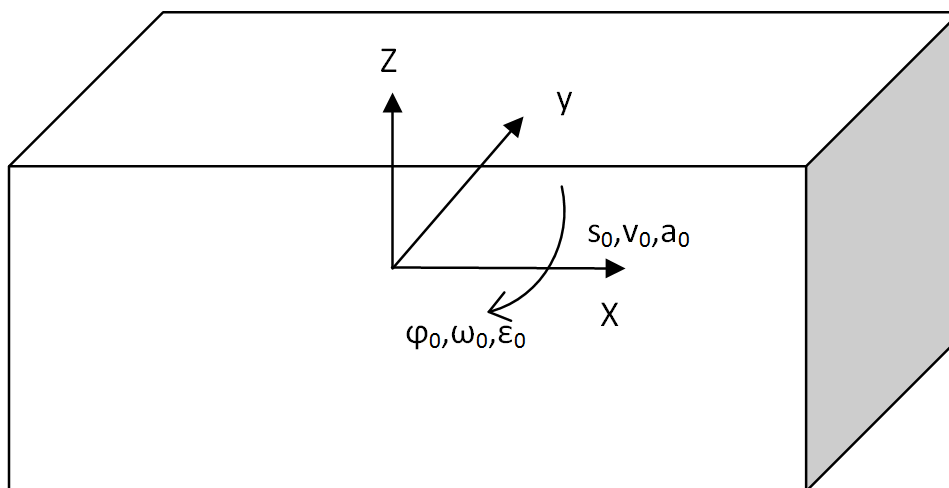
Simulační model je definován pohybem těžiště v prostoru. Tento pohyb je následně přepočítán pomocí matic na pohyb kontaktních bodů kol a země. Dále jsou vypočteny silové účinky v těžišti a kontaktních bodech. Jedná se tedy o přímou úlohu kinematiky. Pro výpočet je použitý program Mathcad, ale je možno použít i jiný výpočetní software.

Ve výpočtu je použita hodnota smykového tření $f_0=0,61$. Hmotnost robotu $m_r=20\text{kg}$. Hodnoty tuhosti a tlumení nejsou potřeba. Rozměrové parametry byly nastaveny podle modelu.

V následujícím textu jsou uvedeny jen základní rovnice pro výpočet. Celkové výpočty včetně výsledků jsou uvedeny v příloze.

Výpočet kinematických parametrů

Výpočet podvozku je zahájen definováním pohybu těžiště mobilního robotu následujícími parametry:



Obr.16. Pohyb těžiště robotu

t - rozsahem času

s_0 - vzdálenost mezi těžištěm a základním souřadným systémem v ose x

φ_0 - úhel natočení mezi souřadnými systémy kolem osy z

α_0 - natočení osy x vůči počátku

d_0 - posunutí osy z vůči počátku

β - úhel stoupání nakloněné roviny

Pokud si takto definujeme proměnné, pak výsledný pohyb souřadného systému těžiště vůči základnímu souřadnému systému můžeme definovat následovně:

$$A_{b0} = A_{\beta} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta_0 & -\sin \theta_0 \cos \alpha_0 & \sin \theta_0 \sin \alpha_0 & s_0 \cos \theta_0 \\ \sin \theta_0 & \cos \theta_0 \cos \alpha_0 & -\cos \theta_0 \sin \alpha_0 & s_0 \sin \theta_0 \\ 0 & \sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 & d_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (26)$$

Výpočet je prováděn maticově. A_{β} označuje matici pro přepočet na pohyb po nakloněné rovině. Poloha těžiště v ose x v čase $s_0(t)$ a úhel natočení kolem osy z v čase $\Phi_0(t)$ jsou vypočteny pomocí zadaných hodnot polohy, rychlosti a zrychlení těžiště.

Z vyčíslené matice můžeme odečíst hodnoty polohy v posledním sloupci matice a to v prvním řádku polohu vůči ose x základního souřadného systému. V druhém řádku posledního sloupce hodnotu polohy v ose y základního souřadného systému a ve třetím řádku polohu v ose z základního souřadného systému. Hodnoty rychlostí v osách základního souřadného systému dostaneme první derivací poloh podle času. Druhou derivací podle času dostaneme hodnoty zrychlení.

Výpočet polohy bodu kontaktu i-tého kola se zemí v základním souřadném systému je vypočten pomocí vztahu:

$$T_{ki} = A_{b0} \cdot A_{ki} \quad (27)$$

Matice A_{ki} je maticí polohy a natočení bodu kontaktu i-tého kola vůči těžišti robotu. Z výsledné matice $T_{ki}(t)$ lze rovněž vyjádřit polohu, rychlosti a zrychlení v osách základního souřadného systému. Polohu mezi souřadnými systémy těžiště a kola p_{ki} si vyjádříme jak 1-3 řádek čtvrtého sloupce matice A_{ki} .

Výpočet rychlosti v místě kontaktu i-tého kola se vypočte pomocí Newton-Eulerova výpočtu translační rychlosti z rychlostí těžiště:

$$v_i = v_0 + \omega_0 \times p_{ki} \quad (28)$$

Kde p_{ki} je poloha souřadného systému kola vůči těžišti. Zrychlení kola je vypočteno pomocí Newton-Eulerova výpočtu translačního zrychlení:

$$a_i = a_0 + \varepsilon_0 \times p_{ki} + \omega_0 \times (\omega_0 \times p_{ki}) \quad (29)$$

Poslední člen ve výpočtu zrychlení je zrychlení odstředivé. Tento výpočet je pro obecný pohyb. Jelikož je celý výpočet podvozku prováděn v rovině lze tyto vztahy dále zjednodušit a urychlit tak výpočet.

Výpočet dynamických parametrů

Pomocí Newton - Eulerovy metody pro výpočet reakcí jsou vypočteny síly a momenty působící na těžiště. Tyto síly a momenty jsou přepočteny a rozděleny do šesti kontaktních bodů kol. Z normálových sil a rychlostí pohybu kontaktů jsou vypočteny síly vznikající od tření v kontaktu. Třecí síly jsou vypočteny pomocí Coulombova modelu smykového tření.

Pro výpočet dynamických parametrů Newton - Eulerovou metodou je zapotřebí, aby byly definovány následující parametry:

g - gravitační zrychlení

f_0 - součinitelem tření

m_r - hmotnost robotu

J_r - matice setrvačnosti

F_v - vnější síla působící na robot

p_{tb} - vzdálenost vnější síly od těžiště

n_v - vnější moment působící na těžiště

Pak se vypočtou silové účinky na těžiště jako:

$$F_t = m_r \cdot G - m_r \cdot a + F_v \quad (30)$$

Síla působící na těžiště robotu se skládá z tíhové síly, setrvačné síly způsobené zrychlením robotu a vnější síly.

Moment působící na těžiště robotu se vypočte jako:

$$n_t = n_v + N_t - p_{tb} \times F_v \quad (31)$$

Výsledný moment se skládá z vnějšího momentu, momentu způsobeného setrvačnými účinky a momentem od vnější síly. Takto vypočtené síly a momenty se následně rozpočítají na jednotlivá kola [5].

Pro výpočet rozložení sil musíme nejprve vypočíst jednotkový vektor síly:

$$e_n = F_t / |F_t| \quad (32)$$

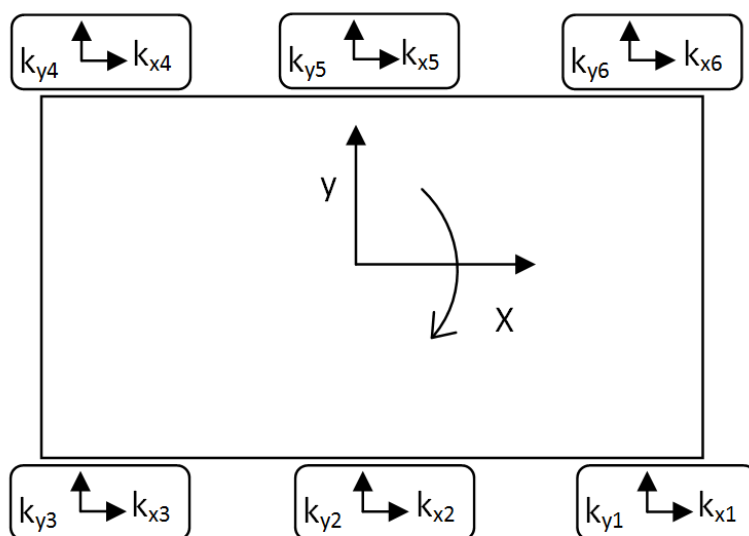
Jednotkovým vektorem síly se provede vektorový součin polohy souřadného systému kola vůči těžišti zleva a zprava:

$$r_i = e_n \times p_{ki} \times e_n \quad (33)$$

S takto získanými poměrnými vektory vypočteme poměrnou velikost síly působící na kolo:

$$p_i = [r_{i+1} \times (\sum_{j=1}^n r_j - r_i - r_{i-1}) + \dots + r_n \times (\sum_{j=1}^{i-1} r_j) + r_1 \times (\sum_{j=2}^{i-1} r_j) + \dots + r_{i-2} \times r_{i-1}] \cdot e_n \quad (34)$$

Ve výpočtu se vždy násobí poměrné vektory následujícího kola po směru hodinových ručiček se součtem poměrných velikostí ostatních kol. Pro lepší představu sestavení výpočtu je uveden příklad pro výpočet poměrné velikosti síly čtvrtého kola šesti kolového robotu.



Obr.17. Schéma šesti kolového robotu

$$p_4 = e_n \cdot [r_5 \times (r_6 + r_1 + r_2 + r_3) + r_6 \times (r_1 + r_2 + r_3) + r_1 \times (r_2 + r_3) + r_2 \times r_3] \quad (35)$$

Z takto vypočtených poměrných velikostí sil se vypočtou síly působící v souřadném systému kola jako:

$$N_i = F_t \cdot p_i / \sum_{j=1}^n p_j \quad (36)$$

Pro rozložení momentů působících v těžišti robotu se nejdříve vypočtou poměrné vektory momentů:

$$p_{ni} = [p_{ki+1} \times (\sum_{j=1}^n p_{kj} - p_{ki} - p_{ki-1}) + \dots + p_{kn} \times (\sum_{j=1}^{i-1} p_{kj}) + p_{k1} \times \\ j=2i-1 p_{kj} + \dots + p_{ki-2} \times p_{ki-1} \cdot p_{ki}] \quad (37)$$

Poměrné vektory momentů se vypočtou z vektorů poloh souřadných systému kol a těžiště p_{ki} . Princip sestavení rovnic je obdobný jako v případě výpočtu poměrných velikostí sil (32). Dále je třeba vypočíst celkový poměrný vektor momentů:

$$p_c = \sum_{j=1}^n \sqrt{(p_{nj} \cdot |p_{kj}|)^2} \quad (38)$$

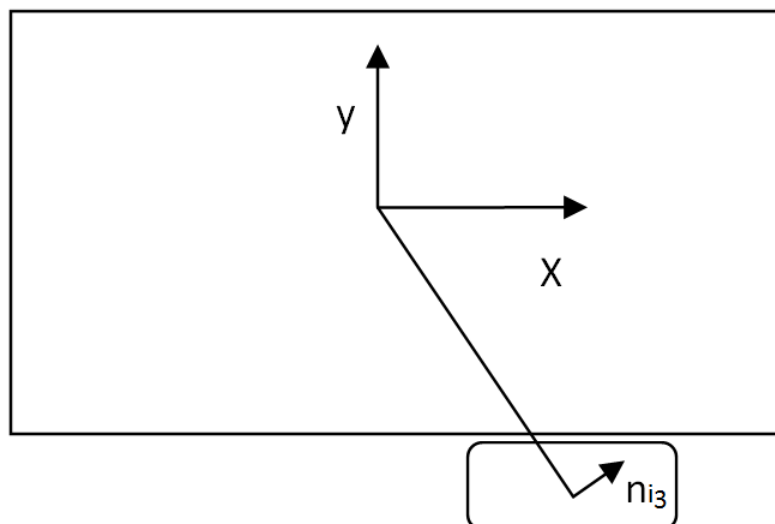
Výsledná reakční síla od momentů v kole se pak vypočte jako:

$$n_i = \begin{bmatrix} n_{t1} * \left(\frac{p_{ni}}{p_c}\right)_1 * \frac{p_{ki1}}{|p_{ki1}|} \\ n_{t2} * \left(\frac{p_{ni}}{p_c}\right)_2 * \frac{p_{ki2}}{|p_{ki2}|} \\ n_{t3} * \left(\frac{p_{ni}}{p_c}\right)_3 * \frac{p_{ki3}}{|p_{ki3}|} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Výpočet musí být proveden zvlášť v každé ose. Kontrola tohoto výpočtu se provede jako suma součinů vypočtených reakčních sil a vzdáleností kol od těžiště:

$$k = \sum_{j=1}^n n_j \cdot |p_{kj}| = n_t \quad (40)$$

Tyto reakční síly jsou vyjádřeny v souřadném systému kolmém na vektor polohy mezi souřadnými systémy viz Obr. 18. V rovině xy působí pouze moment kolem osy z M_z , výsledná reakce od tohoto momentu n_{i3} vychází jako kolmice na spojnici souřadných systémů.



Obr.18. Zobrazení směrů výsledných reakčních sil od momentů

Pro výpočet normálové síly působící ve směru osy z, souřadného systému i-tého kola, se použije vzorec:

$$R_i = N_{i3} + (n_i \times p_{ki} / |p_{ki}|)_3 \quad (41)$$

Normálová síla se skládá z reakční síly v ose z od sil působících na těžiště a reakční síly od momentů působících na těžiště přepočtené do souřadného systému těžiště.

Významnou silovou položkou u smykem řízeného robotu jsou smykové síly. Tyto síly vznikají pouze při zatáčení robotu. Ve výpočtu byl použit Coulombův výpočet smykového tření [9]. Pokud nedochází ke smyku, jsou tyto síly nulové.

Pro tento výpočet je zapotřebí:

v_{0ki} - obvodová rychlost i-tého kola

v_{ki1} - rychlost i-tého kola v ose x souřadného systému robotu

v_{ki2} - rychlost i-tého kola v ose y souřadného systému robotu

R_i - normálovou sílu působící v místě kontaktu i-tého kola

Pak je možno vypočítat prokluzovou rychlost v podélném směru:

$$v_{ski} = v_{0ki} - v_{ki1} \quad (42)$$

Celková prokluzová rychlost kola, udávající vzájemnou rychlost kontaktu mezi kolem a podložkou je:

$$v_{fki} = \sqrt{v_{ski}^2 + v_{ki2}^2} \quad (43)$$

Síla ve směru osy x souřadného systému robotu je rovná silou způsobenou smykem a reakčními silami:

$$F_i = -R_i \cdot f_0 \cdot v_{ski}/v_{fki} + N_{i1} + (n_i \times p_{ki}/|p_{ki}|)_1 \quad (44)$$

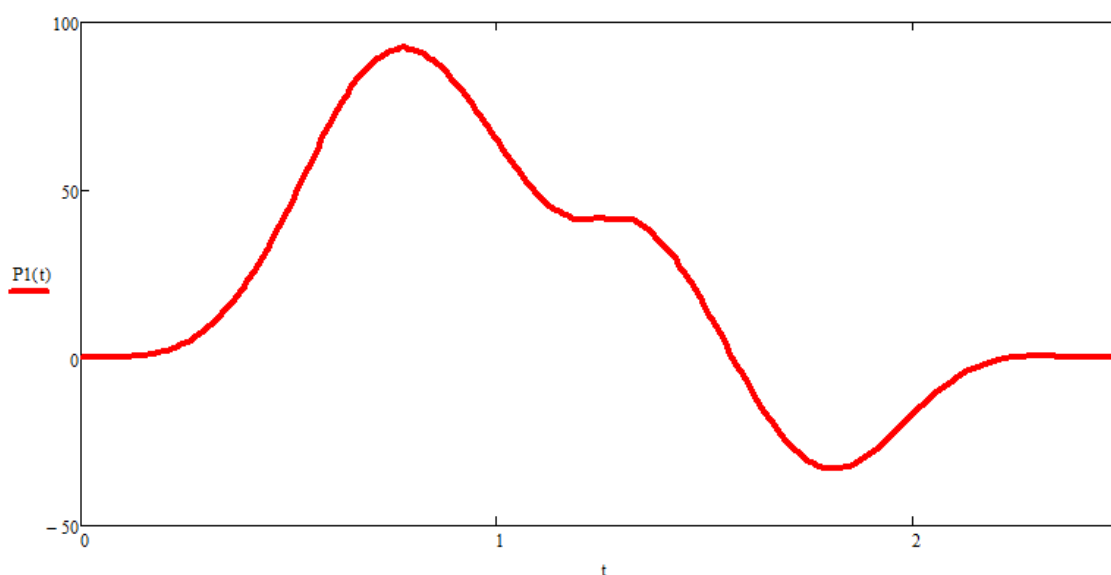
Síla v ose kola je rovná smykové síle a reakčním silám:

$$S_i = R_i \cdot f_0 \cdot v_{ki2}/v_{fki} + N_{i2} + (n_i \times p_{ki}/|p_{ki}|)_2 \quad (45)$$

Výkony potřebné k pohonu jednotlivých kontaktních bodů jsou vypočteny pomocí rychlostí a sil působících v kontaktních bodech. Pak se potřebný výkon k pohybu i-tého kola rovná:

$$P_i = -(F_i \cdot v_{ki1} + S_i \cdot v_{ki2}) \quad (46)$$

Celkový výkon motoru se vypočítá jako součet výkonu jednotlivých kol, které pohání.



Obr.19. Výkon pravého motoru při jízdě do kopce

Celá simulační úloha je počítána pro prostorový model. Není zde zjednodušení na jednotlivé rovinné úlohy. Z tohoto důvodu je nutné počítat všechny rychlosti a síly působící v souřadných systémech v každém časovém okamžiku. Výpočet je proto výpočetně náročný a pro simulaci delších časových simulací nevhodný.

3.4. Možnosti použití

Simulační modely vytvořené v programu Adams a ProEngineer jsou použitelné pro pohyb po libovolně členitém povrchu. Simulační model si poradí i s pohybem kdy nejsou všechna kola v kontaktu se zemí. Simulační modely si poradí i s prokluzem kol.

Simulační prostředí ProEngineeru není schopno zobrazit hodnoty rychlostí v kontaktech v souřadném systému robotu, vůči kterému se jeví jako nehybné. Hodnoty rychlostí je proto nutné zjistit v globálním souřadném systému. Pomocí úhlů natočení mezi souřadnými systémy jsou poté rychlosti přepočteny do souřadného systému robotu.

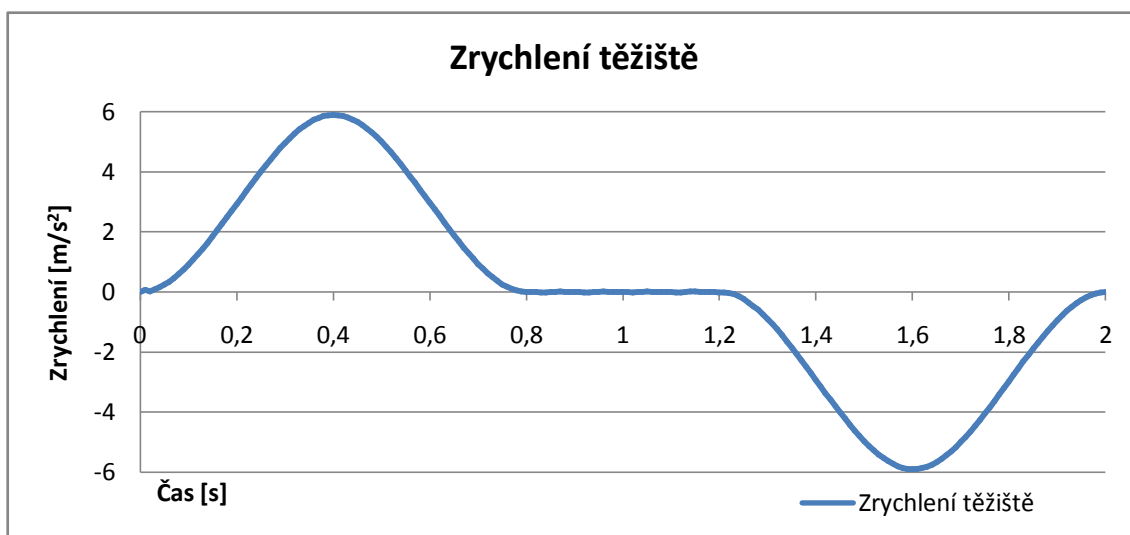
Navržený výpočtový model v prostředí Mathcad má řadu omezení. Výpočet je možno použít pouze pro pohyb kdy jsou všechna definovaná kola v kontaktu se zemí. Výpočtový model nepočítá s prokluzem kol, proto je nutné, aby byla v každém momentu simulace splněná podmínka $a \geq g \cdot f_0$. Navržený výpočtový model počítá s absolutně tuhým kontaktem.

4. Výsledky simulací

Pro porovnání výsledků byly simulovány typické pohyby vykonávané robotem. Jedná se o jízdu po rovině, jízdu po nakloněné rovině a otáčení se na místě. Všechny simulační programy dovolují získat mnoho dat. Pro porovnání výsledku simulací však budou použity pouze rychlosti a síly působící na přední pravé kolo a výkon pravého motoru. Veškeré simulační modely a výpočty jsou obsaženy na příloženém CD.

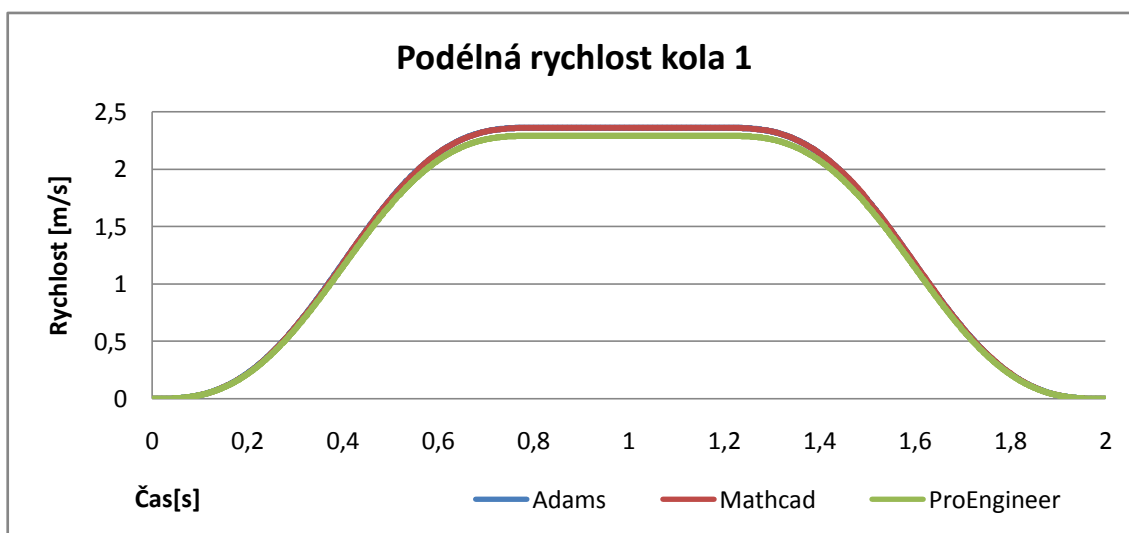
4.1. Simulace jízdy po rovině

Simulace jsou definovány tak aby těžiště mobilního robotu zrychlilo na nominální otáčky motoru, poté jel rovnoměrným přímočarým pohybem a nakonec zastavilo. Absolutní hodnota zrychlení je po celou dobu menší než $|g \cdot f_0|$, tedy menší než $5,98m/s^2$. Pokud by tato podmínka nebyla splněna výsledky programu Mathcad by nebyly správné. Těžiště dosáhne během simulace maximálního zrychlení $5,91m/s^2$.



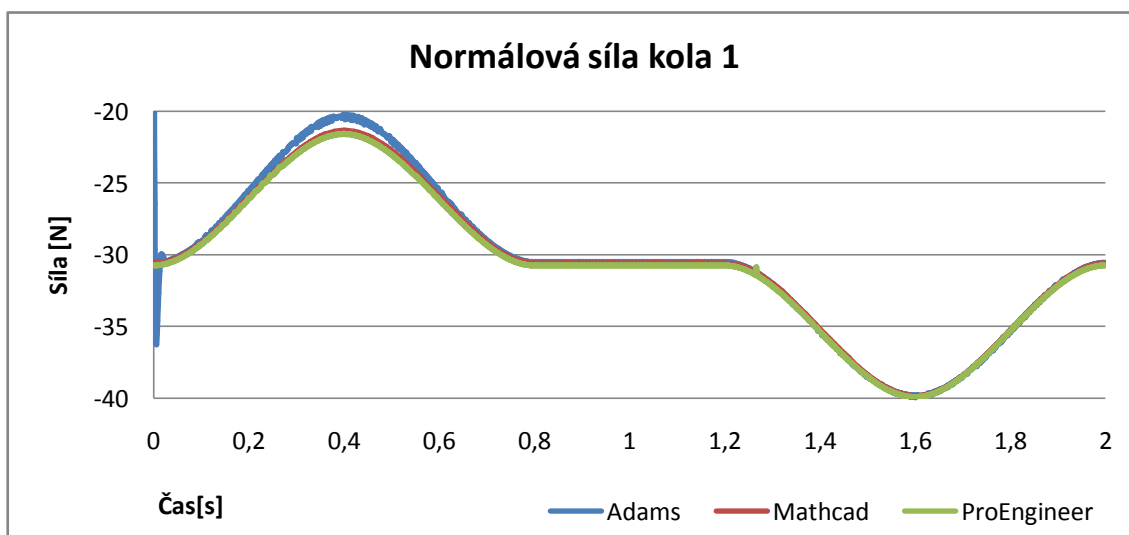
Graf.1. Zrychlení těžiště při jízdě po rovině

Toto zrychlení bylo zadáno do simulačních modelů a to tak, že bylo přepočteno pomocí průměru kola a převodu na otáčky motoru.



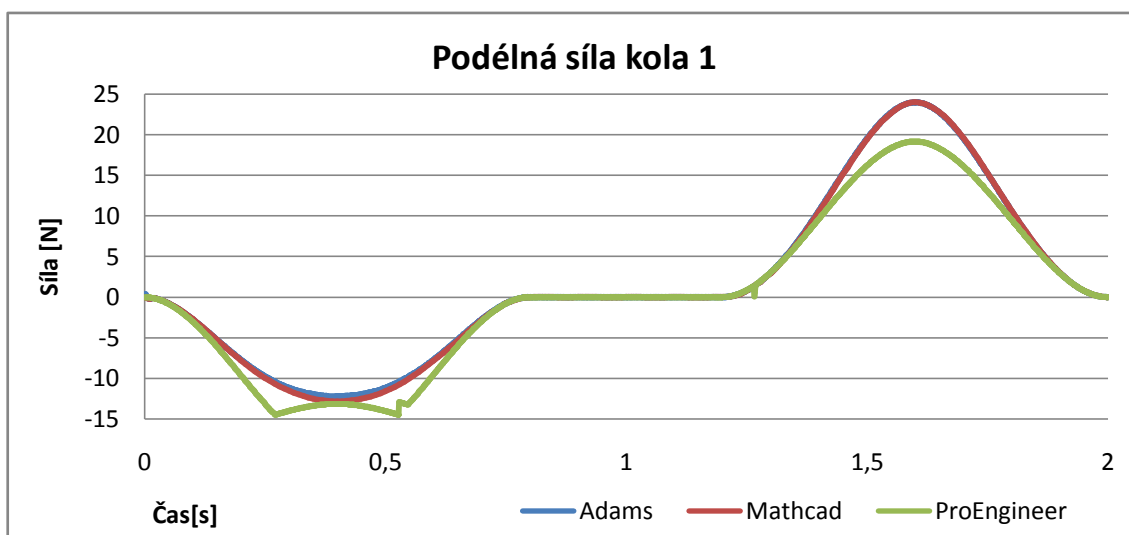
Graf.2. Podélná rychlost předního pravého kola

Podélné rychlosti vypočtené simulacemi Adams a Mathcad mají totožný výsledek. Hodnoty vypočtené pomocí ProEngineer jsou nižší, protože dochází k prokluzu předních kol během simulace. K chybě dochází kvůli přeúčtení (redundantnosti) systému. Simulační model se nepodařilo nastavit tak, aby k prokluzu nedocházelo.



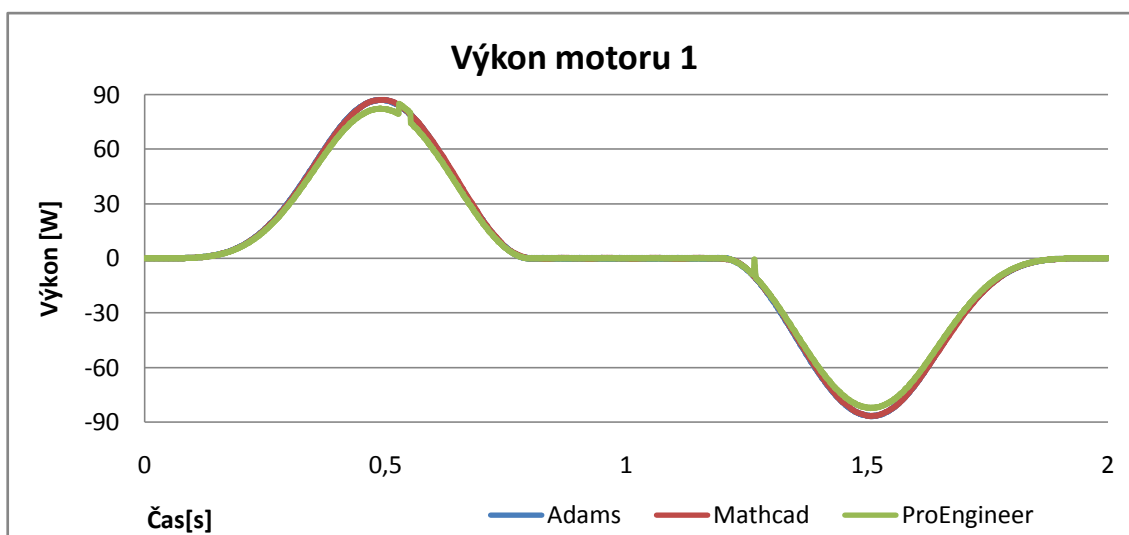
Graf.3. Normálová síla předního pravého kola

Průběh normálové síly během simulace je u simulace Mathcad a ProEngineer totožná. U simulace Adams musí být model v počátečním okamžiku umístěn nad zemí, proto dochází v počáteční fázi simulace ke skokové změně normálové síly. Tento počáteční náraz se šíří simulací dokud není utlumen.



Graf.4. Podélná síla předního pravého kola

Simulace Adams a Mathcad jsou téměř identické, kromě počáteční fáze kde stejně jako u normálové síly dochází z důvodu nárazu k odchylce. Výsledný graf ProEngineer je ovlivněn dvěma faktory. Prvním faktorem je, že systém je v tomto podélném směru redundantní (výpočetní rovnice simulace nejsou správně nastaveny). Tento problém se však nepodařilo odstranit. Systém si s tím poradil tak, že podélnou sílu rozložil na kola rovnoměrně. Druhým faktorem, který ovlivňuje simulaci je prokluz předního páru kol při maximálním zrychlení. Při brzdění se tento prokluz objevuje na zadním páru kol.

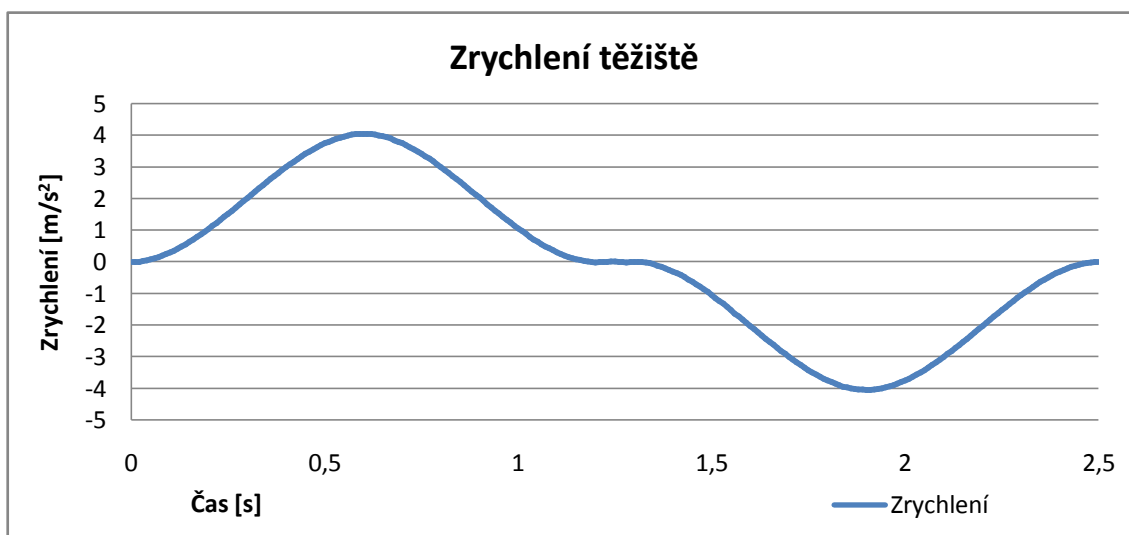


Graf.5. Výkon pravého motoru

Výkony simulací Adams a Mathcad jsou totožné. U simulace ProEngineer je výsledný výkon menší z důvodu nedosažení stejné rychlosti pohybu jako u simulace v Adamsu a Mathcadu.

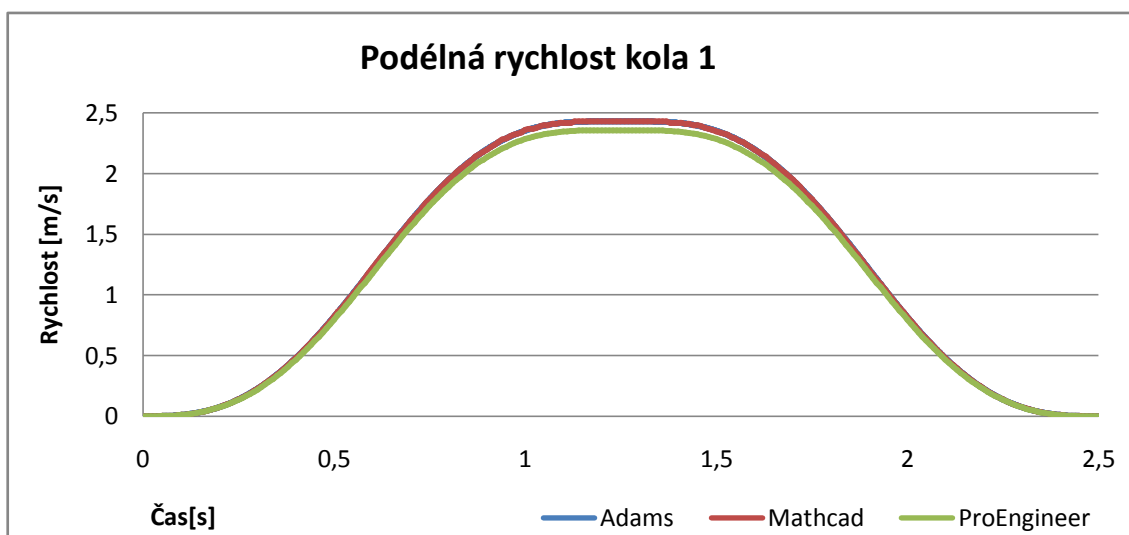
4.2. Jízda do kopce

Dalším simulovaným pohybem mobilního robota je pohyb do kopce. Těžiště robota se bude pohybovat po nakloněné rovině s úhlem stoupání $\beta=10^\circ$. Těžiště zrychlí na nominální otáčky motoru, poté se bude pohybovat rovnoměrným přímočarým pohybem a poté zastaví. Aby byla splněna podmínka, že nedojde k prokluzu, je zrychlení těžiště v každém okamžiku menší než $|g \cdot f_0 \cdot \cos \beta|$ tedy $5,89\text{m/s}^2$. Po problémech s prokluzem u předchozí simulace ProEngineer je maximální zrychlení $4,05\text{m/s}^2$.



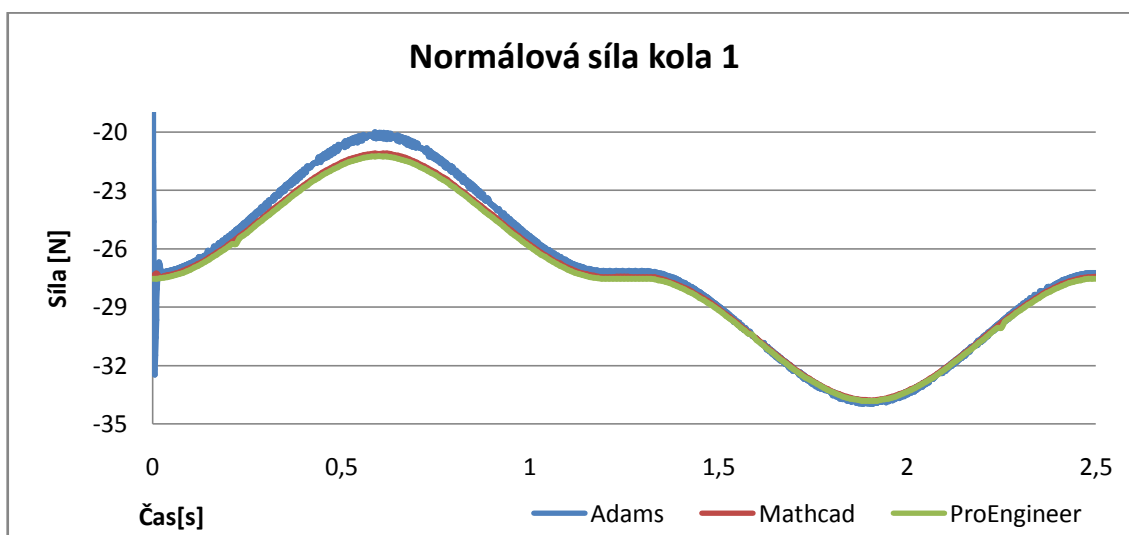
Graf.6. Zrychlení těžiště při jízdě do kopce

Toto zrychlení bylo zadáno do simulačních modelů a to tak, že bylo přepočteno pomocí průměru kola a převodu na otáčky motorů. U simulace Mathcad bylo zadáno přímo zrychlení těžiště.



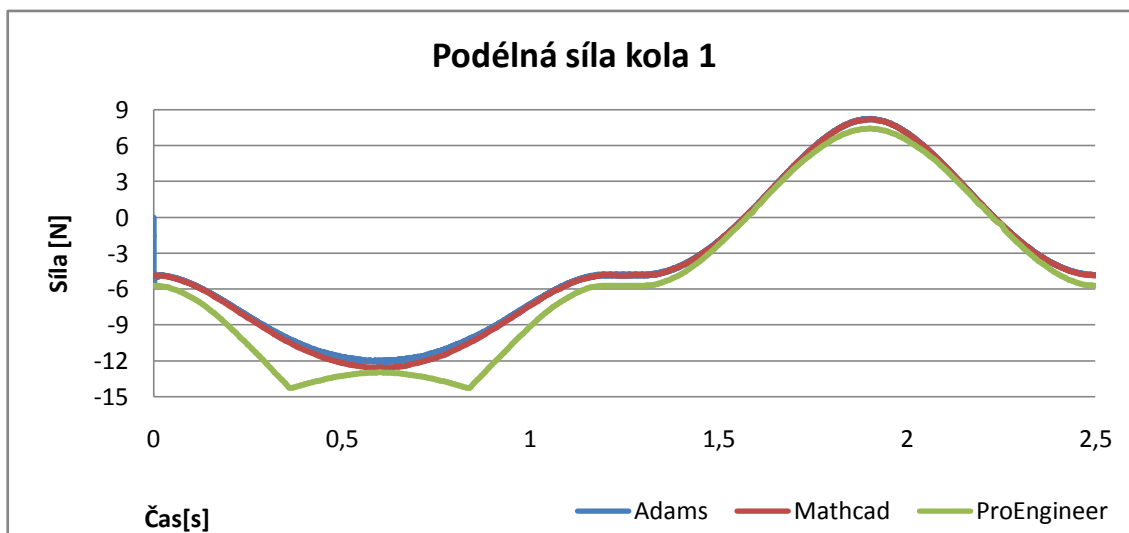
Graf.7. Rychlost kola 1 ve směru jízdy do kopce

Rychlost v podélném směru je u simulace Adams a Mathcad stejná u simulace ProEngineer je tato rychlost nižší a to z důvodu opětovného prokluzu kola. U simulace ProEngineer dochází k prokluzu i při výrazně nižším zrychlení než je mezní zrychlení.



Graf.8. Normálová síla při jízdě do kopce

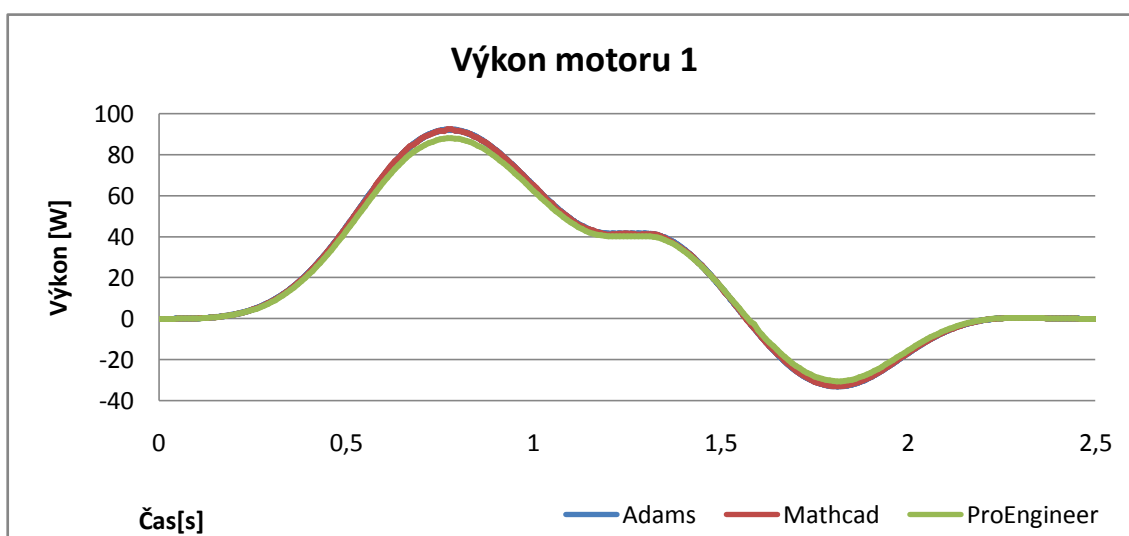
Simulace Adams v počátku simulace musí být opět umístěn nad zemí proto dojde v počátku simulace k nárazu. Síla nárazu se šíří v simulaci dál dokud nedojde k utlumení. U simulace ProEngineer je průběh totožný se simulací Mathcad.



Graf.9. Podélná síla při jízdě do kopce

Simulace Adams je v počátku simulace ovlivněna počáteční polohou umístěnou nad zemí. Postupným tlumením dochází k tomu, že výsledky simulace Adams a Mathcad jsou totožné. U simulace ProEngineer je výsledná síla průměrem všech sil působících na kola proto jsou všechny podélné síly kol stejné. Tuto vlastnost si můžeme ověřit výpočtem podélné síly při rovnoměrném přímočarém pohybu ta je rovna:

$m_r \cdot (-g) \cdot \sin \beta / 6$ tedy -5,67N. Simulace Adams a Mathcad tyto síly neprůměrují ale počítají je s ohledem na geometrii kol. U simulace ProEngineer při maximálním zrychlení dochází na předním kole k prokluzu.

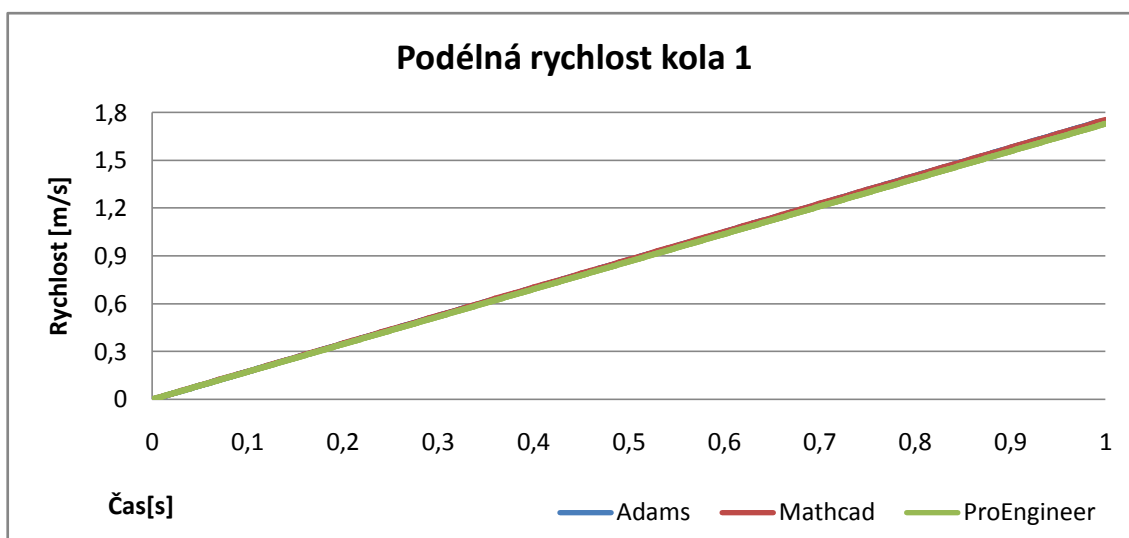


Graf.10. Výkon motoru při jízdě do kopce

Výsledky simulací Adams a Mathcad jsou shodné. U simulace ProEngineer je výsledný výkon vždy nižší z důvodu nemožnosti dosažení stejných rychlostí a zrychlení kvůli prokluzu kol. Správnost výpočtu si můžeme ověřit na části grafu při přímočarém pohybu a to vzorcem $m_r \cdot g \cdot \sin \beta \cdot v/2$. Rychlost při rovnoměrném přímočarém pohybu je dle grafu 7 je $v=2.43\text{m/s}$. Potřebný výkon levého motoru k překonání stoupání je 41.4W.

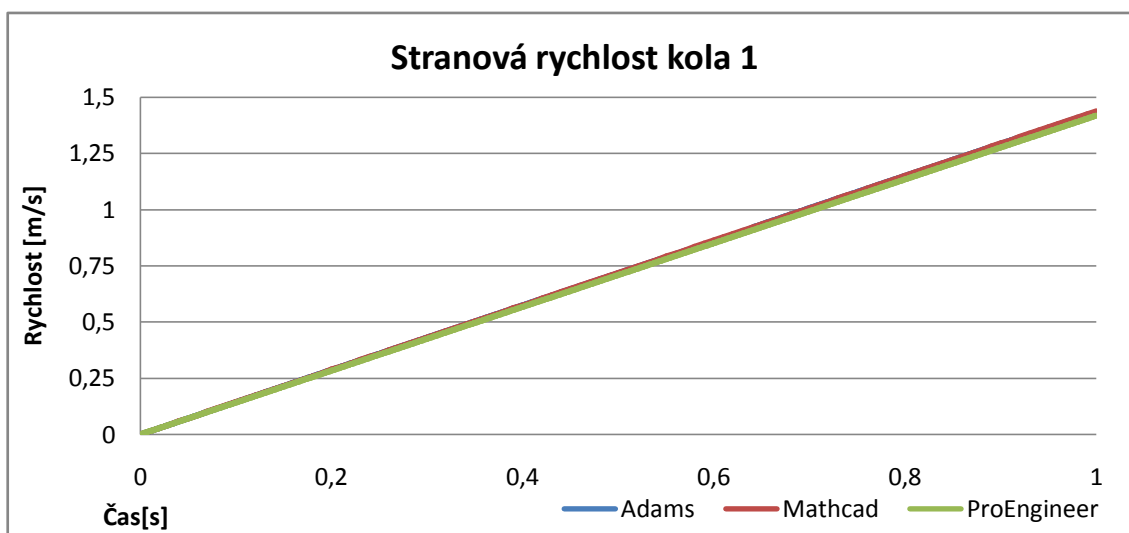
4.3.Otáčení se na místě

Mobilní robot je řízen pomocí smyku. Řízení smykem je energeticky náročné, proto jej budeme simulovat. Simulaci provedeme pro otáčení mobilního robotu na místě. Pohyb pro simulaci byl zvolen rovnoměrně zrychlený pohyb. Oproti předchozím simulacím byla tato simulace definována konstantním úhlovým zrychlením motoru. Úhlová rychlost během tohoto pohybu vzroste z 0 s^{-1} na nominální otáčky 3500 s^{-1} . Směr otáčení levého a pravého motoru je opačný. Ve výsledném pohybu se těžiště mobilního robotu nepohybuje. Dochází pouze k otáčení mobilního robotu okolo svého těžiště.



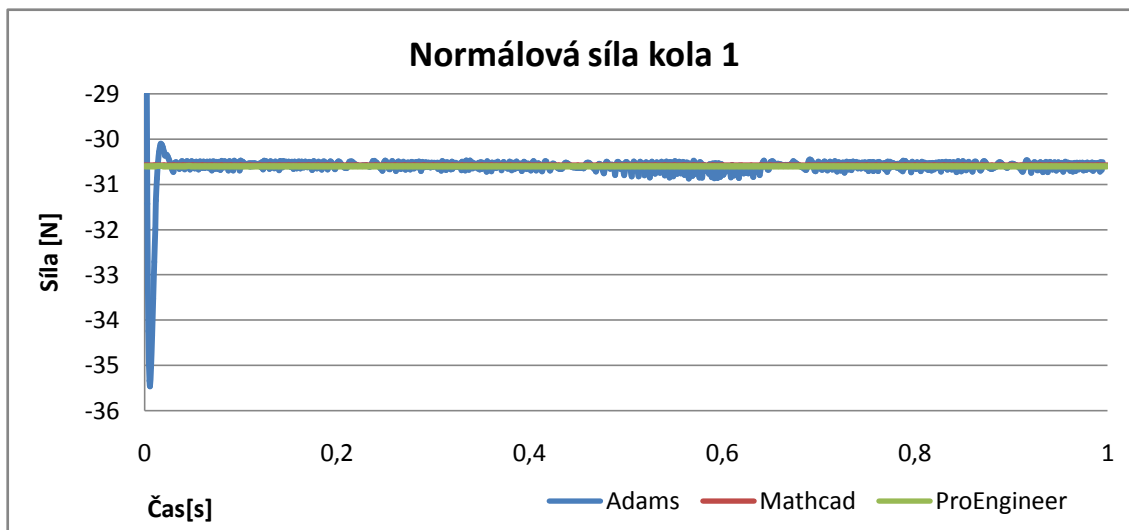
Graf.11. Podélná rychlost předního pravého kola

Rychlost je u všech simulací stejná. Velikost podélné rychlosti je u všech kol stejná mění se pouze směr. Pokud dochází ke smyku, simulační model ProEngineer není redundantní.



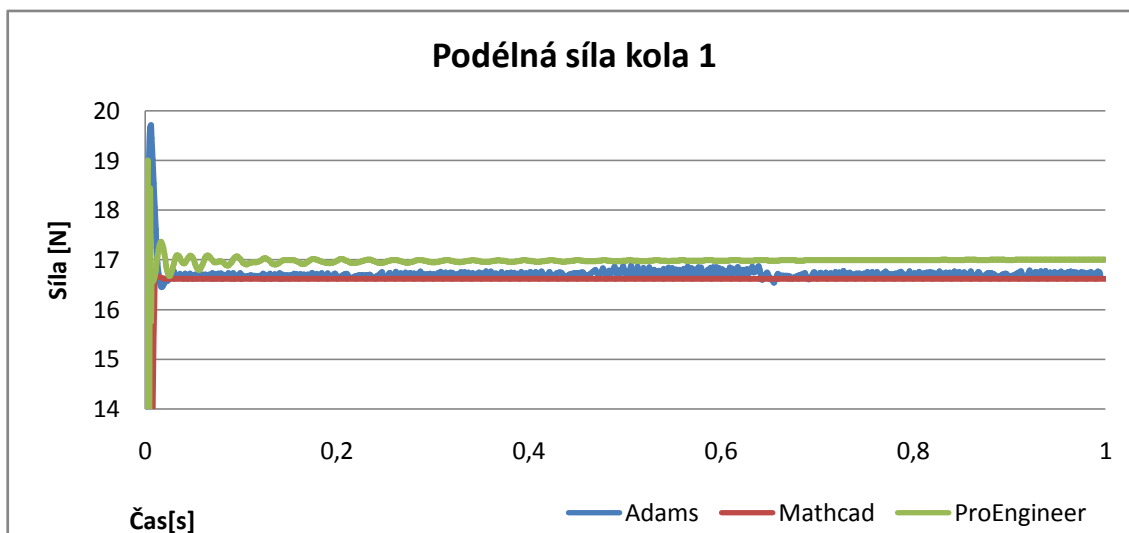
Graf.12. Rychlost v ose předního pravého kola

V předchozích simulacích nedocházelo ke změně směru pohybu a hodnota stranových rychlostí byla 0m/s. V této simulaci v důsledku smyku již stranovou rychlost zanedbat nejde. Hodnoty stranové rychlosti jsou u všech simulací stejné. Stranové rychlosti jsou stejné u kol umístěných v jedné ose.



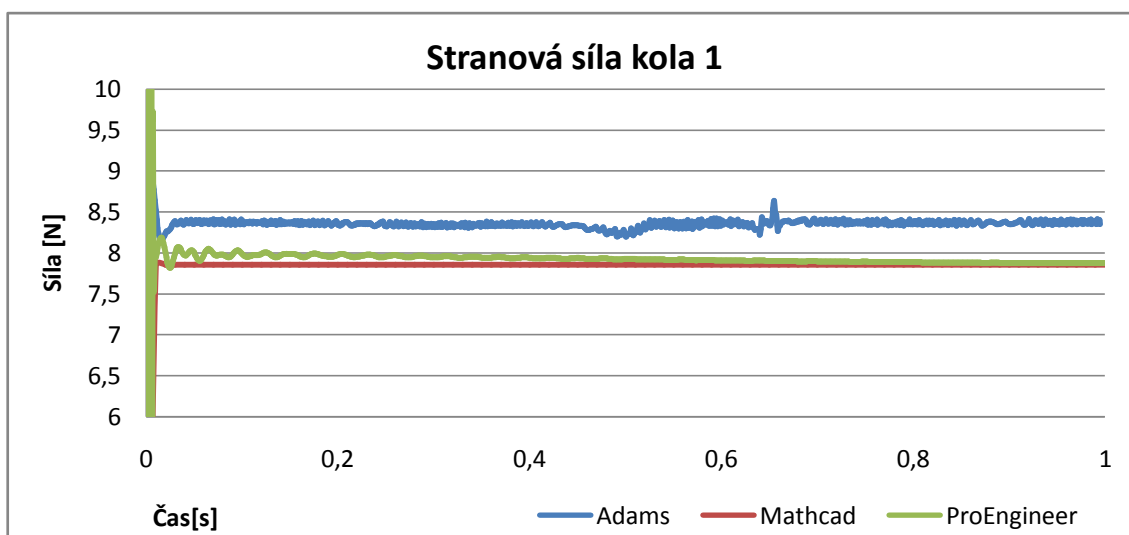
Graf.13. Normálová síla předního pravého kola

U simulace Adams v počátku simulace dochází k výkmitu, který je následně u tlumen. Během pohybu dochází k oscilaci kolem hodnoty vypočtené simulačními modely Mathcad a ProEngineer. Výsledky simulací Mathcad a ProEngineer jsou stejné.



Graf.14. Podélná síla působící na přední pravé kolo

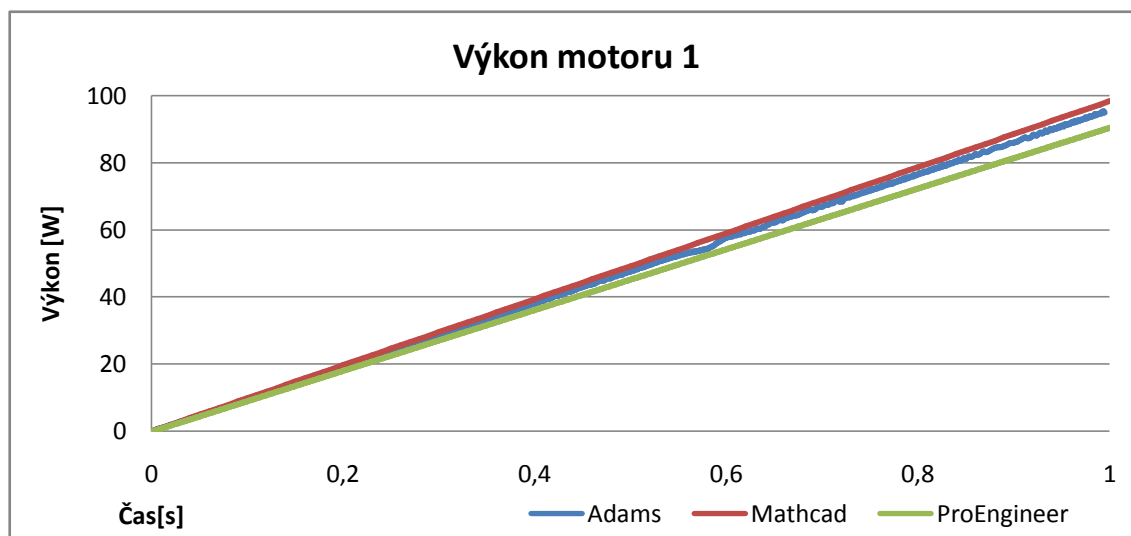
Podélná síla v počátku simulace je nulová, protože se kolo nepohybuje nepůsobí na něj pouze normálová síla. Jakmile se kolo začne pohybovat vzroste síla na konstantní hodnotu. U simulace Adams a ProEngineer dochází k postupnému ustálení, zatímco simulace Mathcad se ustálí na konstantní hodnotě okamžitě. Simulace ProEngineer není v této simulaci redundantní. Proto jsou silové výsledky působící na kola rozdílné a ne aritmetickým průměrem jako v případě simulací jízdy po rovině a do kopce.



Graf.15. Síla v ose předního pravého kola

V počátku simulace dojde ke skokové změně síly, ta v případě simulace Adams a ProEngineer způsobí kmitání hodnot. Hodnoty simulací se ustálí na konstantní hodnotě. Výsledná hodnota simulace v Adamsu a ProEngineeru je větší než u simulace v

Mathcadu. Rozdíl mezi hodnotami způsobují rozdílná nastavení materiálových vlastností kola a země. V podélném směru se kolo po povrchu odvaluje a rozdílnost materiálových vlastností se tolik neprojeví.



Graf.16. Výkon pravého motoru

Graf výkonu motoru je lineární. Hodnoty simulací se však liší. Tento graf potvrzuje energetickou náročnost řízení smykem. Výsledný výkon je, i při relativně malém úhlovém zrychlení motoru, větší než výkon u simulace jízdy po rovině a jízdy do kopce.

4.4. Zhodnocení výsledků

Výsledky simulací jsou vyhodnoceny tak, že za správné hodnoty jsou považovány výsledky zjištěné pomocí výpočtu v Mathcadu. Výsledky zjištěné pomocí programů Adams a ProEngineer jsou s výpočtem porovnány pomocí následujícího vzorce. Ve vzorci jsou použity průměry druhých mocnin hodnot, protože hodnoty nabývají kladných i záporných hodnot.

$$\sqrt{\left|1 - \frac{1}{n} * \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2}\right|} * 100 [\%]$$

(47)

x - hodnoty zjištěné simulací

y- hodnoty zjištěné výpočtem

Simulace jízdy po rovině

	Adams	ProEngineer
Podélná rychlost	0.01%	2.96%
Normálová síla	0.56%	0.46%
Podélná síla	0.75%	6.87%
Výkon motoru	0.03%	4.96%

Tab.5. Statistické zhodnocení jízdy po rovině

Výsledky simulace Adams se liší s početním výpočtem maximálně o 0,75%. Simulace ProEngineer je vlivem prokluzu kol výrazně odlišná. Podélná síla je navíc zatížena chybou způsobenou průměrováním sil.

Simulace jízdy do kopce

	Adams	ProEngineer
Podélná rychlost	0.01%	2.97%
Normálová síla	1.03%	0.32%
Podélná síla	2.51%	14.80%
Výkon motoru	0.05%	4.27%

Tab.6. Statistické zhodnocení jízdy do kopce

Výsledky rychlostí jsou u simulace Adams stejné. Odchylka silových hodnot se zvýšila. Hodnoty výkonu jsou ale totožné. U simulace ProEngineer jsou odchylky podobné výsledkům simulace jízdy po rovině. Změna působení gravitace ještě více odhalila zdroj chyby simulace a to podélnou sílu, která se výrazně zvýšila.

Simulace otáčení na místě

	Adams	ProEngineer
Podélná rychlost	0.10%	1.38%
Stranová rychlost	0.12%	1.38%
Normálová síla	0.42%	0.05%
Podélná síla	0.54%	2.18%
Stranová síla	6.28%	0.85%
Výkon motoru	2.88%	8.14%

Tab.7. Statistické zhodnocení otáčení na místě

Ze statistického srovnání simulací je vidět, že rychlosti a normálová síla jsou vypočteny jen s malou statistickou odchylkou. Větší statistické odchylky vznikají při výpočtu stranových sil u simulace Adams a u podélných sil u simulace ProEngineer. Tyto chyby se dále projevují u výkonu motoru, který je přímo úměrný tření, které musí být překonáno.

Zhodnocení

Ze srovnání výsledků vyplývá, že hodnoty rychlostí a výkonů zjištěné simulací v programu Adams jsou téměř totožné s výsledky vypočtenými. Největší statistické odchylky vznikají u simulace otáčení na místě a to u hodnot stranových sil a výkonu motoru. Maximální rozdíl hodnot u stranových sil je 0,59N. Maximální rozdíl hodnot výkonu je 2,63W.

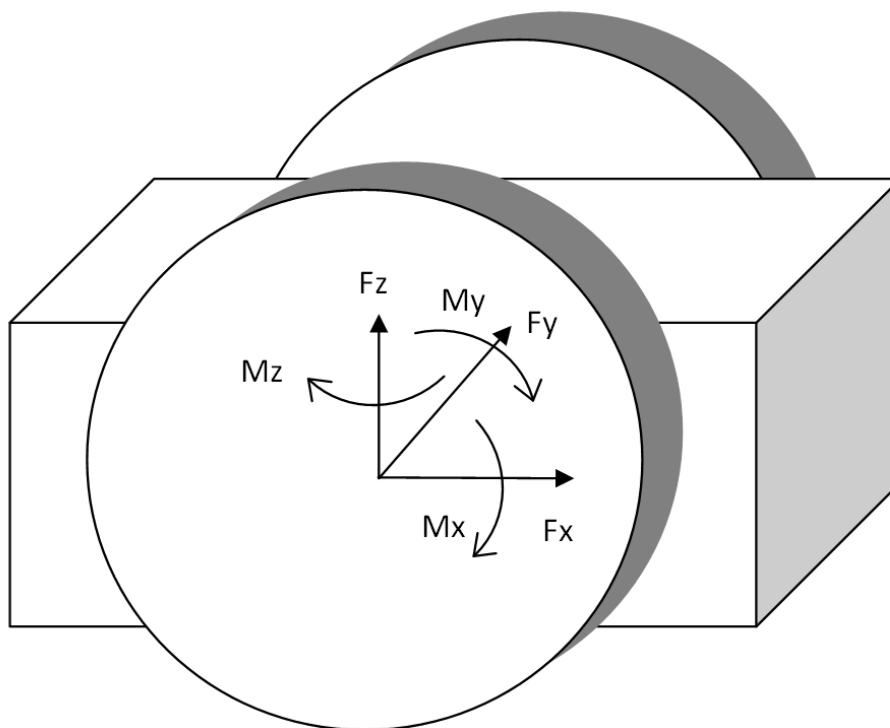
Odchylky u simulací v ProEngineeru jsou větší než u simulací v Adamsu. Je to způsobeno problémy se simulací popsanými výše. Největší statistická odchylka je u simulace jízdy do kopce a to 14,8%. Maximální rozdíl hodnot podélné síly je 3,82N. Druhá největší statistická odchylka je u simulace otáčení na místě. Maximální rozdíl hodnot výkonu je 7,95W. Z konstrukčního hlediska je možno takto velké odchylky zanedbat.

Simulační program Adams dovoluje nasimulovat velké množství pohybů bez větších omezení. Výsledky tohoto programu jsou totožné s výsledky získanými početně. Výpočet je velmi rychlý díky převádění prostorových úloh na rovinné. Nevýhodou tohoto systému je velmi špatné uživatelské rozhraní. Rozměrové parametry simulovaných těles se v průběhu simulace velmi špatně mnění. Nevýhodou je také nastavení kontaktu, který se nastavuje pomocí tuhosti. Tuhost však není tabulkovou hodnotou a proto je nutné si pro každou simulaci zjistit tuto hodnotu experimentálně. Simulovaný objekt se občas chová nelogicky (např.: rozkmitání celého simulovaného objektu) a je proto nutné aby uživatel takového chování odhalil a odstranil.

Simulační program ProEngineer má přívětivé uživatelské prostředí s výborným nástrojem pro modelování, proto se přímo nabízí využití simulační nadstavby a kontrolovat potřebné hodnoty v průběhu návrhu. Tento krok však nedoporučuji, neboť hodnoty takto získané jsou nepřesné. Simulovaný pohyb je navíc potřeba počítat s velmi malým časovým krokem to způsobuje velké zpomalení výpočtu. Při simulacích často nastávají problémy (např.: ohlášení chybové hlášky v průběhu simulace, vypnutí celého programu, po uložení simulovaného objektu a opětovném načtení a spuštění simulace nevycházejí stejné výsledky).

Výpočtový model je naprogramován v programu Mathcad, ale je možno jej naprogramovat v jakémkoli výpočetním programu. Výpočtový model dovoluje simulovat celé pohyby. Nedá se však simulovat jakýkoli pohyb, jen pohyby kdy jsou

všechna kola v kontaktu se zemí a nedochází k prokluzu kol v průběhu simulace. Vypočtené hodnoty jsou pokaždé stejně přesné a nezávisí na velikosti časové konstanty mezi kroky. Rozměrové parametry se dají měnit velmi jednoduše. Výpočtový model má svá omezení, která jsou způsobena principem výpočtu. Jako příklad je použita následující situace:



Obr.20. Příklad omezení výpočtového modelu

Máme následující situaci, dvou kolový podvozek, v jehož středu je umístěno těžiště a jeho osa y je totožná s osou kol. Pokud takovýto podvozek ve výpočtovém modelu zatížíme momentem M_y , výpočet neproběhne a objeví se chybová hláška, že se ve výpočtu dělí nulou. Výpočet není schopen převést tento moment na reakce kol. V praxi je nutno takovýto moment zachytit gyroskopem. Tyto chyby nastávají jako důsledek výpočtu dynamických parametrů z parametru kinematických. Pokud by se výpočet přeprogramoval a byly by z dynamických parametru vypočteny parametry kinematické, tento moment by se projevil jako úhlové zrychlení kolem osy y .

Výpočet simulace je relativně pomalý. Pokud navíc není pohyb těžiště funkcí, ale je zadán tabulkou výpočet je zpomalen interpolací mezi jednotlivými body simulace. Výpočet může být zrychlen vypnutím vykreslování nepotřebných grafů nebo zvětšením časové konstanty mezi kroky bez rizika výpočtových nepřesností.

Pro návrh budoucích slykem řízených robotů doporučuji pomocí výpočtu v Mathcadu stanovit přibližné rozměry a výkony motoru. Pomocí takto zjištěných parametrů vymodelovat základní podobu podvozku v programu ProEngineer. Tento základní model převést do programu Adams a provést simulaci pohybů, které není možno nasimulovat ve výpočtovém modelu, a zjistit zda robot splňuje všechny požadavky. Poté dokončit návrh robotu, případně provést změny podle informací zjištěných ze simulace. Aby tento postup mohl být aplikován, byly vytvořeny výpočty pro dvou kolové až osmi kolové podvozky. Tyto výpočty jsou přiloženy v příloze.

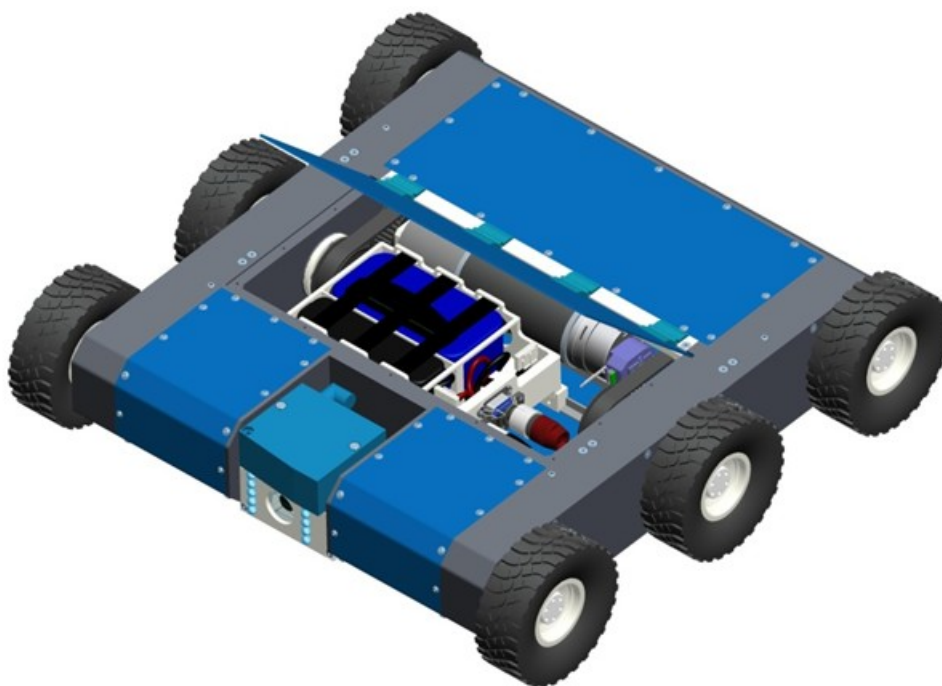
5. Závěr

Cílem této práce byla simulace mobilního slykem řízeného podvozku pomocí simulačního programu Adams. V úvodu práce je popsán výpočetní postup simulačního programu Adams pro kontaktní analýzu. Parametry pomocí kterých jsou nastavovány kontakty simulačních programů.

Ze zkoumaného mobilního robotu byly odečteny rozměrové a hmotnostní parametry, pomocí kterých byly vytvořeny simulační modely v programu Adams, Mathcad a ProEngineer. Program Mathcad je výpočetní software a proto byly v tomto softwaru naprogramovány matematické rovnice popisující vztahy mezi prvky podvozku mobilního robotu.

V takto vytvořených simulačních modelech byly simulovány základní pohyby mobilního robotu a to pohyb po rovině, pohyb po nakloněné rovině a otáčení na místě. Z porovnání výsledku bylo zjištěno, že výpočet pomocí programu Adams a Mathcad je totožný. Výsledky zjištěné programem ProEngineer byly zatíženy chybou, kterou se nepodařilo odstranit, a výsledky se odchylovaly od hodnot zjištěných pomocí programů Adams a Mathcad.

Pro zjednodušení návrhu budoucích slykem řízených robotů byly naprogramovány v Mathcadu výpočty dvou až osmi kolových robotů.



Obr.21. Analyzovaný mobilní šesti kolový robot

Diplomová práce byla řešena a podpořena v rámci projektu studentské grantové soutěže fakulty strojní VŠB - TUO v roce 2011 (Průzkumný mobilní robot pro složky IZS - SP2011/54).

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Václavu Krysovi Ph.D. za vedení diplomové práce, připomínky při jejím vypracování a poskytnuté informace.

Také bych chtěl poděkovat Bc. Davidu Hanzlíkovi za poskytnuté materiály a informace o šestikolovém mobilním robotu.

6. Literatura

- [1] ČSN 01 6910 Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.
- [2] ČSN ISO 690 Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.
- [3] KÁRNÍK, L. Servisní roboty. 1. vydání. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 139 s. ISBN 80-248-0626-6.
- [4] Kárník, L. Servisní roboty - Modelování a analýza.[online] Dostupné z www: <http://robot.vsb.cz/podklady-pro-vyuku.htm>
- [5] KRAULER, Jan a Miroslav UHER. *Fuzzy prediktor pro kinematicko silové řízení kráčejícího robota* [online]. Brno, 2001 [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/matlab01/kauler.pdf. Katedra technické kybernetiky a vojenské robotiky.
- [6] Mostýn, V. - Skařupa, J. Teorie průmyslových robotů. 1. vydání, Košice: Edice vědecké a odborné literatury – Strojní fakulta TU v Košicích, 2001, 150 stran; ISBN 80-88922-35-6
- [7] NOVÁK, P. Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení. 1. vydání. Praha: BEN Praha, 2005. 247 s. ISBN 80-7300-141-1.
- [8] SMRČEK, J.; KÁRNÍK, L.; BOBOVSKÝ, Z. [I] Robotika – Servisné roboty na pásovom podvozku. Navrhovanie, konštrukcia, riešenia.[I] 1. vydání. Košice: Edícia ved. a odb. literatúry SjF TU, 2010. 248 s.
- [9] ŠOLC, František, Tomáš NEUŽIL, Jakub HRABEC a Jaroslav ŠEMBERA. Kinematický model kolového, smykem řízeného robota. *ATP Journal* [online]. 2008, roč. 2008, Plus1 [cit. 2012-03-30]. Dostupné z:

http://www.atpjournal.sk/buxus/docs//casopisy/atp_plus/plus_2008_1/plus01_05.pdf

- [10] FyzWeb: Měření smykového tření. KATEDRA DIDAKTIKY FYZIKY MFF UK V PRAZE. *FyzWeb* [online]. 14.6.2010 [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: <http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=149>
- [11] MSC Software Corporation [online]. 2012 [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: <http://www.mssoftware.com/>
- [12] My Physics Lab: Rigid body collision. NEUMAN, Erik. *My Physics Lab* [online]. 2004 [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: <http://www.myphysicslab.com/collision.html>
- [13] Wikipedia: Contact mechanics. *Wikipedia* [online]. 9.2.2012 [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Contact_mechanics
- [14] Wikipedia: Poisson's ratio. *Wikipedia* [online]. 19.3.2012 [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Poisson%27s_ratio
- [15] Wikipedia: Young's modulus. *Wikipedia* [online]. 29.3.2012 [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Young%27s_modulus

Seznam příloh

Příloha A: Výpočet jízdy do kopce pomocí programu Mathcad

CD:

-jízda po rovině -jízda po rovine adams.bin
-jízda po rovine mathcad.xmcd
-jízda_po_rovine_proe.asm
-jízda po rovine statistika.xlsx

-jízda do kopce -jízda do kopce adams.bin
-jízda do kopce mathcad.xmcd
-jízda_do_kopce_proe.asm
-jízda do kopce statistika.xlsx

-točení na místě -toceni na miste adams.bin
-toceni na miste mathcad.xmcd
-toceni_na_miste_proe.asm
-toceni na miste statistika.xlsx

-výpočty -2 kolový podvozek.xmcd
-3 kolový podvozek.xmcd
-4 kolový podvozek.xmcd
-5 kolový podvozek.xmcd
-6 kolový podvozek.xmcd
-7 kolový podvozek.xmcd
-8 kolový podvozek.xmcd